



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ENERGETICKÝ ÚSTAV**

ENERGY INSTITUTE

**POSOUZENÍ HLUČNOSTI VZDUCHOTECHNICKÉ  
VYÚSTKY PRO KABINU OSOBNÍHO VOZU**

EVALUATION OF NOISE OF VENTILATION OUTLET FOR A PASSENGER CAR CABINE

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Stanislav Libřický**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**doc. Ing. Jan Jedelský, Ph.D.**

**BRNO 2016**



# Zadání diplomové práce

Ústav: Energetický ústav  
Student: **Bc. Stanislav Libřický**  
Studijní program: Strojní inženýrství  
Studijní obor: Technika prostředí  
Vedoucí práce: **doc. Ing. Jan Jedelský, Ph.D.**  
Akademický rok: 2015/16

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

## **Posouzení hlučnosti vzduchotechnické vyústky pro kabinu osobního vozu**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Vzduchotechnická zařízení musí kromě své primární funkce splňovat také další požadavky, jimiž jsou např. nízká hlučnost a vibrace. U vzduchotechnických vyústek je důležitý zejména hluk generovaný prouděním (aeroakustika).

Práce bude zaměřena na experimentální posouzení hluku při proudění vzduchu z vzduchotechnické vyústky určené pro kabinu osobního vozu a návrh možností snížení této hlučnosti.

K měření bude využit hlukoměr. Při práci bude nutné získat hlubší poznatky k problému, upravit akusticky stávající zkušební místnost i měřené zařízení, optimalizovat metodiku měření hluku s ohledem na specifické vlastnosti místnosti i zdroje hluku, hluk změřit pro několik variant nastavení vyústky a vyhodnotit.

### **Cíle diplomové práce:**

Rešerše literatury k problému

Zaučení s přístroji

Návrh a provedení akustických úprav místnosti a zkušebního zařízení

Příprava experimentu a odladění metodiky měření

Experimentální posouzení hluku hlukoměrem pro několik variant nastavení vyústky

Vyhodnocení naměřených výsledků, grafické zpracování, interpretace

Návrhy opatření pro snížení hluku ve vyústkách

**Seznam literatury:**

Smetana, C. a kol.: Hluk a vibrace – měření a hodnocení. ISBN 80-90 1936-2-5, Sdělovací technika, Praha 1998.

Nový, R.: Hluk a chvění, Vydavatelství ČVUT, Praha, 2009

Székyová, M., Ferstl, K., Nový, R.: Větrání a klimatizace. Jaga, 2006, ISBN: 8080760373, 9788080760373, 359 pages

Beranek, L.L.: Noise and Vibration Control. McGraw-Hill, Inc., 2006

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty



## ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá problematikou hlučnosti vzduchotechnických vyústek v osobním automobilu. Je zde popsáno snižování hluku akustického pozadí, odladění experimentální metodiky měření a seznámení s měřicím zařízením. V dalším kroku je provedeno měření jednotlivých konstrukčních variant vyústek, následné zpracování výsledků a porovnání variant mezi sebou. Podle těchto výsledků jsou vybrány nejlepší varianty a navržena opatření pro snížení hluku ve vyústkách.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Hluk, vyústka, vzduchotechnika, automobil, proud vzduchu

## ABSTRACT

The thesis deals with issues of noise ventilation outlets in a passenger car. There is a description of the noise reduction in the acoustic background, optimizing experimental measurement methodology and familiarization with measuring equipment. The next step includes measuring of individual outlet options, results post-processing and comparison of tested alternatives. Based on these results the best variants are chosen and measures for decreasing noise in the ventilation outlets are proposed.

## KEYWORDS

Noise, ventilation outlet, air-conditioning, automobile, airflow





## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

LIBŘICKÝ, S. *Posouzení hlučnosti vzduchotechnické vyústky pro kabinu osobního vozu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 80 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jan Jedelský, Ph.D.







## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením doc. Ing. Jana Jedelského, Ph.D. s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu použitých zdrojů.

V Brně dne 27. května 2016

.....

Bc. Stanislav Libřický





## PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat panu doc. Ing. Janu Jedelskému, Ph.D. za cenné rady, připomínky a trpělivost, kterou mi projevoval v průběhu vzniku této diplomové práce. Práce vznikla za podpory projektu „Centrum kompetence automobilového průmyslu Josefa Božka TE01020020“ a projektu NETME CENTRE PLUS (LO1202) za finančního přispění Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy v rámci účelové podpory programu “Národní program udržitelnosti I”.



## OBSAH

Úvod .....	8
1 Akustika.....	9
1.1 Zvuk a hluk .....	9
1.2 Základní akustické veličiny .....	10
1.3 Váhové filtry .....	12
1.4 Mechanický hluk.....	12
1.5 Aerodynamický hluk.....	13
1.6 Problematika hlučnosti příváděcích vyústek .....	14
1.7 Hluk automobilového systému větrání a klimatizace .....	15
2 Experimentální zařízení.....	19
2.1 Měřicí přístroje, snímače a příslušenství .....	19
2.2 Zvukoměr 2270.....	20
2.3 Vzduchotechnické komponenty, příslušenství .....	21
2.4 Dispozice laboratoře .....	24
3 Návrh a provedení akustických úprav místnosti a zkušebního zařízení.....	26
3.1 Odhlučnění místnosti .....	26
3.2 Odhlučnění měřicí tratě .....	29
4 Metodika měření a vyhodnocení dat .....	31
4.1 Provozní nastavení měřicí trati .....	31
4.2 Varianty nastavení vyústek .....	32
4.3 Rozložení a stanovení oblasti měřících bodů .....	35
4.4 Stanovení hladiny akustického výkonu .....	36
4.5 Volba krytu na mikrofon.....	37
5 Nejistoty měření .....	40
5.1 Celková směrodatná odchylka .....	40
5.2 Směrodatná odchylka nestability .....	40
5.3 Směrodatná odchylka reprodukovatelnosti.....	40
5.4 Rozšířená nejistota měření.....	41
5.5 Stanovení nejistot měření.....	41
6 Naměřená data .....	42
7 Analýza a vyhodnocení výsledků .....	44
7.1 Porovnání jednotlivých variant, rozbor výsledků .....	44
7.1.1 Vliv pořadí lamel na $L_{WA}$ .....	44
7.1.2 Vliv počtu lamel na $L_{WA}$ .....	46
7.1.3 Vliv rozdílných uzavíracích klapků na $L_{WA}$ .....	48

7.1.4	Vliv použití vodicích lopatek na $L_{WA}$ .....	49
7.1.5	Vliv tvarů lamel na $L_{WA}$ .....	50
7.1.6	Rozdíl mezi potrubím s obloukem a bez .....	51
7.2	Porovnání variant z hlediska směřování a hluku .....	52
7.3	Frekvenční analýza .....	55
7.3.1	Varianta BM_5H5V_1BV_BD_Q80 .....	55
7.3.2	Frekvenční charakteristika akustického pozadí .....	58
7.3.3	Varianta 3V3H.....	58
7.3.4	Frekvenční charakteristika vodicích lopatek .....	60
7.4	Grafická vizualizace výsledků .....	61
7.4.1	Tecplot .....	61
7.4.2	Porovnání vybraných variant.....	61
7.4.3	Vizualizace frekvenční analýzy .....	62
7.4.4	Vizualizace hlučnosti varianty 5H5V .....	62
7.4.5	Grafické zobrazení $L_p$ a $L_{pA}$ u varianty 3H5V_DL .....	63
7.5	Výpočetní vztah vyhodnocování vyústek .....	63
8	Návrhy na opatření pro snížení hluku ve vyústkách.....	66
8.1	Použití absorpčního tlumiče.....	66
8.2	Výběr uzavírací klapky .....	67
8.3	Použití vodicích lopatek do oblouku .....	67
8.4	Použití aerodynamických tvarů lamel.....	68
8.5	Návrh vyústky .....	68
9	Normy a nařízení vlády .....	70
9.1	Norma ČSN EN ISO 5136.....	70
9.2	Norma ČSN EN ISO 3740.....	70
9.3	Norma ČSN EN ISO 3744.....	70
9.4	Výpis norem vztahujících se k tématu .....	70
	Závěr.....	71
	Seznam použitých zdrojů.....	73
	Seznam použitých veličin.....	76

## ÚVOD

V dnešní době jsou osobní vozy nedílnou součástí každodenního života. Výrobci osobních automobilů se snaží zvyšovat komfort interiéru vozidla, s čímž je spojeno také snižování hlučnosti. Hluk patří mezi negativní faktory životního prostředí, kterým se začíná věnovat zvýšený ohled. Tato práce se zabývá hlučností vzduchotechnických výústek v kabině osobního automobilu, které jsou jedním z největších zdrojů hluku v interiéru. Cílem práce je porovnání hlučnosti různých variant. Následně jsou navržena opatření pro její snížení.

Pro stanovení výsledných hodnot hladin akustického tlaku a výkonu je vyžadováno splnění určitých podmínek kladených na zdroj hluku a prostředí, v němž měření probíhá. Z tohoto důvodu musí být nejprve upravena laboratoř větrání, která dosud není pro měření hluku uzpůsobena. Po dostatečném snížení hluku pozadí bude optimalizována metodika měření (nalezení optimálního počtu bodů, vzdálenosti umístění mikrofону od středu vyústky, výběr krytu na mikrofon pro použití v silném proudu vzduchu apod.).

Dalším krokem bude zpracování výsledků a následné porovnávání všech nastavení. Data budou zpracovávána s využitím programu Microsoft Excel. Jednotlivé výstupy z tohoto programu budou dále analyzovány a následně dojde ke komparaci různých druhů nastavení vyústky. Současně bude vytvořeno grafické znázornění hlukové mapy na měřené kulové ploše okolo vyústky.

V závěru budou jednotlivé výsledky použity k navržení opatření pro snížení hluku ve vyústkách, což v případě naplnění stanovených cílů může posloužit k vývoji dané technologie v praxi.





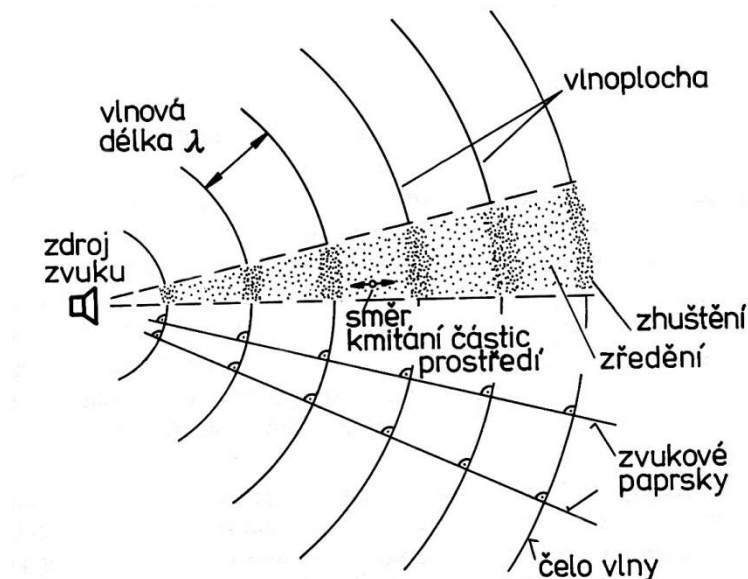
# 1 AKUSTIKA

V této kapitole jsou definovány zvuk, hluk, základní veličiny vztahující se k akustice a je tu základní seznámení se vzduchotechnickým systémem v osobním automobilu.

## 1.1 ZVUK A HLUK

Zvuk je přirozenou součástí životního prostředí, běžných aktivit člověka a přírodních jevů. Může se šířit do velkých vzdáleností a pro člověka je jedním z nejdůležitějších zdrojů informací o okolním světě. Dále je také velice důležitým poplašným signálem před hrozícím nebezpečím a mimo jiné působí i na nervový systém člověka. [1]

Zvuk je mechanické kmitání částic plynů, pružných pevných látek nebo kapalin v pružném prostředí, které se od zdroje šíří ve vlnoplochách v závislosti na fyzikálních vlastnostech prostředí. Vlnoplocha je geometrický prostor bodů kmitajících v určitém okamžiku se stejnou fází. Tato spojitá plocha má ve většině případů kulový nebo rovinný tvar. Akustická vlna se ve vzduchu za normálních podmínek pohybuje přibližně rychlostí 343 m/s. Těmito normálními podmínkami se rozumí  $t = 20\text{ °C}$  a  $p_{\text{atm}} = 101,3\text{ kPa}$ . V tuhém prostředí je vlnění nazýváno jako vibrace. Kmitání lze dále rozdělovat na mechanické vlnění podélné (kmity jsou se směrem šíření rovnoběžné) a příčné (kmity jsou kolmé ke směru šíření vlny). Plyny a kapaliny jsou pružné pouze ve smyslu objemové stlačitelnosti, a proto se zde vyskytuje pouze vlnění podélné. V pevných látkách se může objevit podélné i příčné, ale i jejich kombinace. To je dáno tím, že pevné látky jsou pružné nejen v tlaku a tahu, ale i ve smyku. [2, 3]



Obr. 1 Šíření zvukové vlny[4]

Zvuk se projevuje ve třech základních kmitočtových (frekvenčních) pásmech. Oblast nižších frekvencí než 16 Hz se nazývá *infrazvuk*. V rozsahu od 16 Hz do 20 kHz lze vnímat zvuk lidským uchem a akustické vlnění o kmitočtu vyšším než 20 kHz se označuje jako *ultrazvuk*. [2]

Nežádoucí zvuky, které jsou nepříjemné, rušivé nebo až nebezpečné pro člověka, jsou označovány jako *hluk*. Hluk může způsobovat psychické, zdravotní nebo např. i dorozumívací problémy.

## 1.2 ZÁKLADNÍ AKUSTICKÉ VELIČINY

*Vlnová délka* – Je vzdálenost mezi dvěma nejbližšími body, které jsou v daném časovém okamžiku ve stejném akustickém stavu, neboli též vzdálenost, již urazí za dobu jednoho kmitu zvuková vlna [1]. Vlnová délka ve vzduchu pro nízké frekvence vychází až 17 m a pro oblast vysokých frekvencí naopak nízká v řádech setin metru [2]. Pro vlnovou délku platí vztah:

$$\lambda = \frac{c}{f} = Tc \quad [\text{m}] \quad (1)$$

Kde:  $c$ ...rychlost šíření akustické vlny [m/s]  
 $f$ ...frekvence (kmitočet) [Hz]  
 $T$ ...doba jednoho kmitu (perioda) [s]

*Akustický tlak* – Je to hlavní měřitelná skalární veličina v akustice. Akustický tlak je roven rozdílu celkovému tlaku a tlaku atmosférickému v daném bodě a čase. Akustický tlak je dán vzorcem [1]:

$$p = p_0 \cos \omega \left( \tau - \frac{x}{c} \right) \quad [\text{Pa}] \quad (2)$$

Kde:  $\omega$ ...vlastní úhlová frekvence [ $\text{s}^{-1}$ ]  
 $\tau$ ...čas [s]  
 $x$ ...odlehlost [m]

*Intenzita zvuku* – Je střední časová hodnota měrného akustického výkonu za čas jedné kmitny [5]. Intenzita je vektorová veličina a určuje segment akustické energie šířící se postupnými vlnami za jednu sekundu plochou  $1 \text{ m}^2$ , která je kolmá na směr postupu zvuku [3]. Intenzita je dána vztahem [1]:

$$I = \frac{p_{ef}^2}{2\rho c} \quad [\text{W/m}^2] \quad (3)$$

Kde:  $p_{ef}$ ...efektivní akustický tlak [Pa]  
 $\rho$ ...měrná hmotnost [ $\text{kg/m}^3$ ]

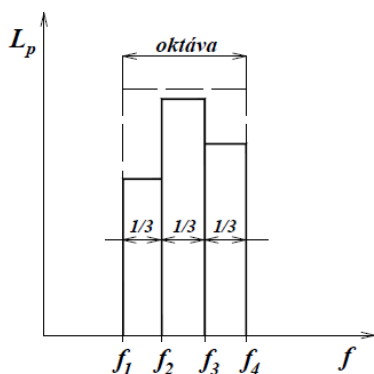
*Akustický výkon* – Je výkon přenášený akustickým vlněním neboli energie zvukových vln za jednotku času vyzařená zdrojem, prošlá plochou nebo dopadající na plochu [5]. Popisuje ho vztah [1]:

$$P = Fv = p v S \quad [\text{W}] \quad (4)$$

Kde:  $F$ ...síla [N]  
 $S$ ...plocha [ $\text{m}^2$ ]

$v$ ...rychlost kmitání částic [m/s]

Z důvodu nevhodného rozsahu a velikosti objektivních veličin ( $p$ ,  $I$ ,  $P$ ) byla použita logaritmická závislost vztažená k určité referenční hodnotě mezi objektivními veličinami a subjektivním vnímáním člověka podle Weber – Fechnerova zákona. Jedná se o tzv. hladiny  $L$  s jednotkou decibel [dB]. Lidské ucho vnímá zvuk spíše v logaritmické stupnici. [1, 5]



Obr. 2 Třetinooktávová pásma, [6]

Hladiny se obvykle vztahují k určitému frekvenčnímu rozsahu. Tento rozsah se nejčastěji rozděluje na oktavová pásma rozdělující celé slyšitelné pásmo na 10 oktáv. Frekvenční pásmo o šířce jedné oktávy je popsáno poměrem krajních frekvencí ohraničujících oktávu a charakterizuje ho vzorec (5). Každou oktávu popisujeme střední frekvencí  $f_m$ , které jsou stanoveny v normě ČSN 35 6870. Další jemnější dělení je rozdělení oktáv na třetiny nazývané třetinooktávová pásma. [1]

$$\frac{f_1}{f_2} = 2 \quad (5)$$

$$f_m = \sqrt{f_1 f_2} \quad [\text{dB}] \quad (6)$$

*Hladina akustického tlaku* – Tato hladina je v praxi nejpoužívanější, protože jde nejsnáze měřit. Je měřítkem energie vysílané zdrojem zvuku a vyjadřuje ji vzorec [1]:

$$L_p = 20 \log \frac{p}{p_0} = 10 \log \frac{p^2}{p_0^2} \quad [\text{dB}] \quad (7)$$

Kde:  $p_0 = 2 \times 10^{-5}$  [Pa]...referenční hodnota (odpovídá hodnotě 0 dB)

*Hladina akustické intenzity* – Pokud zvýšíme akustickou intenzitu o desetinásobek, hladina akustické intenzity stoupne o 10 dB. Tato hladina se téměř neliší od hladiny akustického tlaku, což popisuje upravený vzorec (9) [7].

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad [\text{dB}] \quad (8)$$

$$L_I = L_p - 0,2 \quad [\text{dB}] \quad (9)$$

Kde:  $I_0 = 10^{-12}$  [W/m<sup>2</sup>]...referenční hodnota

*Hladina akustického výkonu* – hladina akustického výkonu je závislá podle vzorce (10) na dohodnuté referenční hladině akustického výkonu, jež se stala mezinárodním standardem využívaným téměř ve všech civilizovaných zemích světa [7].

$$L_w = 10 \log \frac{P}{P_0} \quad [\text{dB}] \quad (10)$$

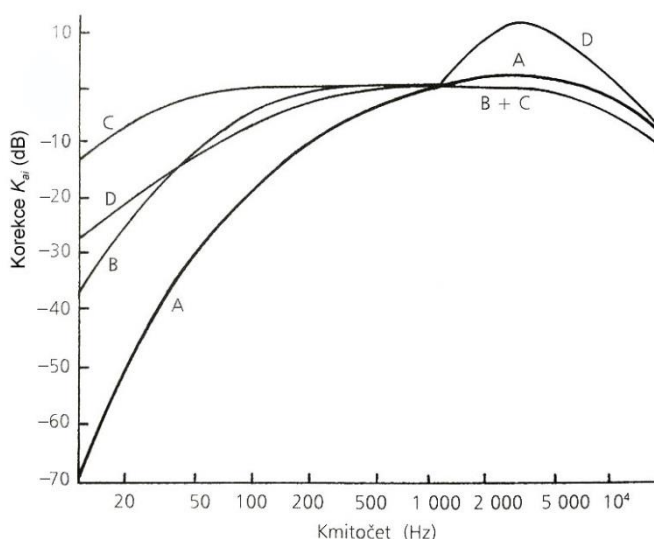
Kde:  $P_0 = 10^{-12}$  [W]...referenční hodnota

### 1.3 VÁHOVÉ FILTRY

Váhové filtry se používají k přepočítávání skutečně naměřených hodnot hladin zvuku na hodnoty odpovídající citlivosti lidského ucha při různých kmitočtech. Nejvíce používaným je váhový filtr A odpovídající křivkám stejné hlasitosti pro 40 Ph. Dále se používají filtry typu B (70 Ph) a typu C (100 Ph), jež jsou využívány v leteckém průmyslu. Váhové filtry se značí písmenem odpovídajícího typu v dolním indexu jako např.  $L_{pA}$ . Lidský sluch je nejcitlivější v oblasti frekvence okolo 1000 Hz, a proto jsou zde nulové korekce. V tab. 1 jsou žlutě vyznačeny střední frekvence  $f_m$  popisující jednotlivé oktávy. Na obr. 3 je i váhový filtr typu B, ale ten se již nepoužívá. [1, 2, 4]

Tab. 1 Korekce jednotlivých frekvencí [1]

$f_m$ [Hz]	Filtr A [dB]	$f_m$ [Hz]	Filtr A [dB]
12,5	-63,4	400	-4,8
<b>16</b>	-56,7	<b>500</b>	-3,2
20	-50,5	630	-1,9
25	-44,7	800	-0,8
<b>31,5</b>	-39,4	<b>1 000</b>	0,0
40	-34,6	1 250	0,6
50	-30,2	1 600	1,0
<b>63</b>	-26,2	<b>2 000</b>	1,2
80	-22,5	2 500	1,3
100	-19,1	3 150	1,2
<b>125</b>	-16,1	<b>4 000</b>	1,0
160	-13,4	5 000	0,5
200	-10,9	6 300	-0,1
<b>250</b>	-8,6	<b>8 000</b>	-1,1
315	-6,6	10 000	-2,5



Obr. 3 Průběhy váhových křivek filtrů, upraveno z [7]

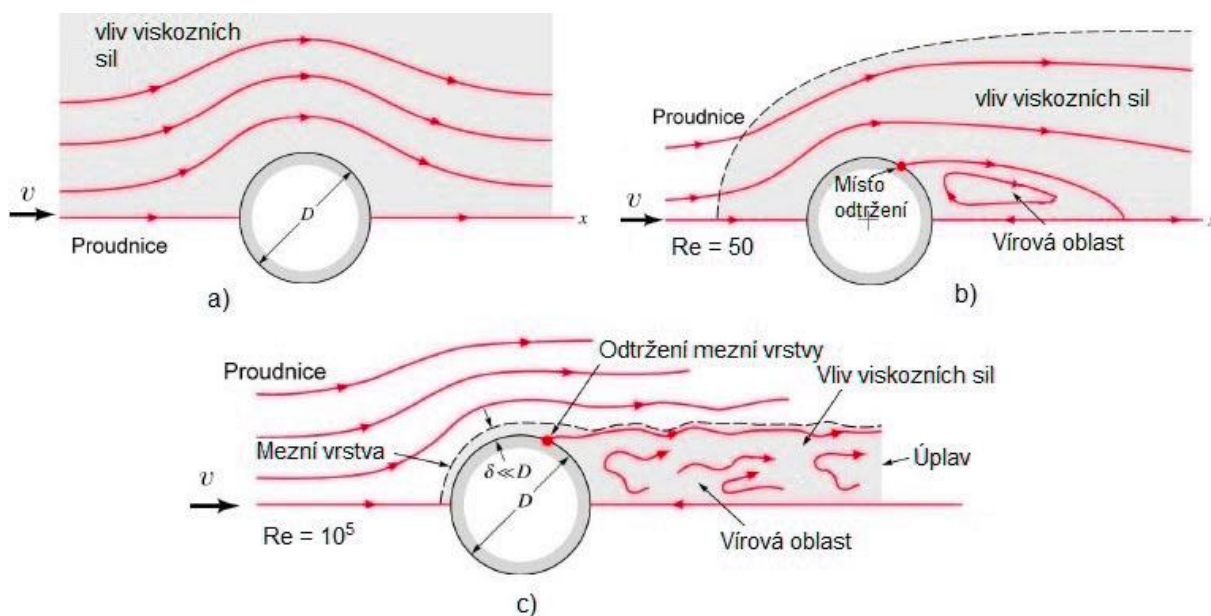
### 1.4 MECHANICKÝ HLUK

Mechanický hluk je akustická energie přenášená do okolí vlivem kmitání těles. V našem případě je tento hluk tvořen ventilátorem (elektromotor, nevyváženost otáčivých částí stroje, špatné mechanické provedení atd.), odkud je šířen konstrukcemi a stěnami vzduchovodu, ze kterých je následně vyzařován do proudu vzduchu v potrubní trase nebo do okolního prostředí. [2, 7]

## 1.5 AERODYNAMICKÝ HLUK

Převažujícím zdrojem hluku z vyústek v osobním automobilu je hluk aerodynamický. U tohoto experimentu dochází k eliminaci hluku šířícího se dále vzduchovodem (aerodynamického i mechanického hluku) pomocí absorpčního komorového tlumiče vloženého do potrubí. Vystupuje zde tedy zejména aerodynamický hluk produkovaný v potrubí za tlumičem.

V potrubí vzniká turbulentní proudění vlivem vyšších rychlostí proudění vzduchu, což má za následek kolísání statického tlaku neboli tzv. pulzace. Pokud jsou pulzace ve slyšitelném frekvenčním pásmu, vyzařují aerodynamický hluk do okolí. Tento hluk se dá definovat jako zvuk působící proudem vzduchu na okolní prostředí. Obtékání těles vířivým, nestacionárním proudem vzduchu je dalším původcem aerodynamického hluku. Na obr. 4 u případu c je možné vidět úplav s vírovou oblastí. V našem případě se jedná o obtékání regulačních clon, klapek nebo lamel ve sledovaných vyústkách. Další příčinou tohoto hluku jsou vířivé proudy vznikající v mezní vrstvě na vnitřním povrchu vzduchovodu. Neméně podstatný je přechod turbulentního nebo pulzujícího proudění do prostředí s klidným téměř nepohybujícím se vzduchem za vyústkou. [2, 7]



Obr. 4 Obtékání těles a) laminární proudění, b) laminární s vírovou oblastí, c) turbulentní proudění, upraveno z [8]

Jedním z dalších aerodynamických původců je tzv. sirénový hluk vznikající nejčastěji ve ventilátorech přerušovaným nebo nepravidelným prouděním vzduchu. [7]

## 1.6 PROBLEMATIKA HLUČNOSTI PŘIVÁDĚCÍCH VYÚSTEK

Vzduchovody jsou zakončovány vyústkami, jimiž je vzduch přiváděn nebo odváděn z místnosti. Z akustického hlediska se jedná o aerodynamický hluk, který je tvořen obtékáním proudu vzduchu okolo lopatkových mříží s různými tvary lopatek. Hlučnost je zde pevně spojena s tlakovou ztrátou při průtoku vzduchu. Celková místní tlaková ztráta uzavírací klapky a lamelové mříže je ovlivněna jednotlivými ztrátami (ztráta vířením za odtokovými hranami, ztráta třením v mezní vrstvě atd.). Při průtoku proudu vzduchu přes mřížku lamel dochází k periodickému uvolňování vírů, což produkuje kolísající vztlačovou aerodynamickou sílu na každou lamelu s přidružením tónové složky ve vyzařovaném zvuku. Tento zdroj se chová jako dipól, jehož osa je rovnoběžná se směrem vztlaču a je doplňkem k aerodynamickému odporu dipólu. Tlaková ztráta se mění s rozdílným vyřešením aerodynamických vlastností jednotlivých konstrukčních prvků vyústek každého z výrobců, proto je velice složité určit vztah, který by popisoval akustické vlastnosti všech typů vyústek. Takovýto vztah je podrobněji rozebírán v kapitole 7.5. [9, 10]

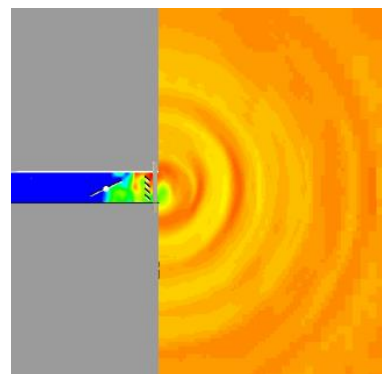
### Ideální podmínky pro testování vyústek

Na obr. 5 je zachyceno zařízení, které zkoumá akustiku vyústek v laboratoři. Vypadá podobně jako touto prací používaná testovací trať popsaná v následující kapitole (ventilátor, uklidňovací potrubí, absorpční tlumič hluku, vyústka). Nejdůležitějším rozdílem je, že vyústka na obrázku je umístěna v přilehlé místnosti vedle místnosti s ventilátorem. Místnosti jsou od sebe akusticky odizolovány a v měřicí místnosti s vyústkou jsou stěny vyloženy pohltivým materiálem. V takto připraveném experimentu nevystupuje hluk pozadí. Pokud je zároveň optimálně zvolena měřicí metoda a současně jsou použity kvalitní měřicí zařízení, měly by být výsledky velmi přesné.



Obr. 5 Zkušebna vyústek, upraveno z [11]

Podle zdroje [11] byl proveden numerický výpočet zjednodušeného modelu vyústky. Na obr. 6 lze pozorovat akustické pole uvnitř potrubí a za vyústkou. Při velmi nízkých rychlostech vzduchu vyzařuje vyústka akustickou energii všesměrově.

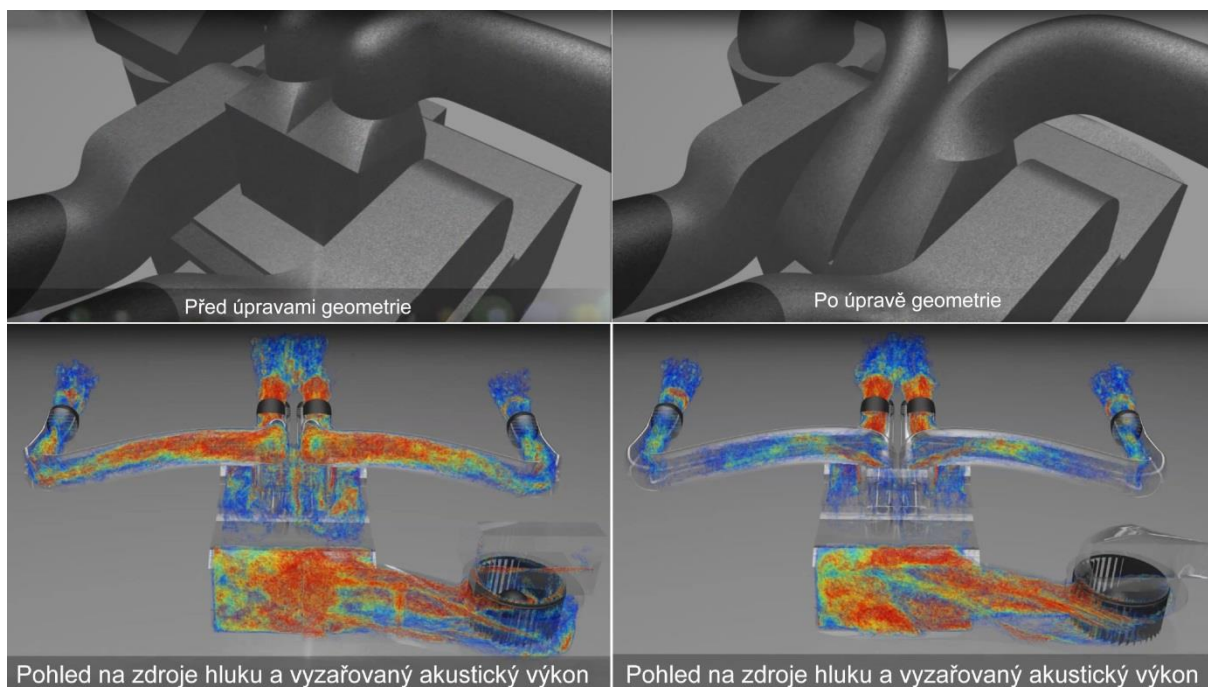


Obr. 6 Akustické pole [11]



## 1.7 HLUK AUTOMOBILOVÉHO SYSTÉMU VĚTRÁNÍ A KLIMATIZACE

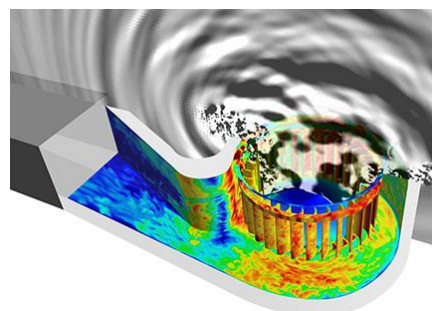
Výrobci v automobilovém průmyslu usilují o snížení hladiny hluku v interiéru vozidla vnímaného cestujícími. Terčem pro zlepšení akustických vlastností se stává hluk tvořený vytápěním, ventilací a klimatizací (HVAC-heating, ventilation and air conditioning). HVAC systém je komplex skládající se z radiálního ventilátoru a směšovací jednotky spojené s mnoha kanály zakončenými vyústkami, kterými je vzduch dopravován na různá místa v kabině automobilu, aby byla zajištěna tepelná a ventilační pohoda člověka a zároveň splněna technická funkčnost, jako např. odtávání čelních a bočních skel. Ventilátor musí dodávat dostatečný dopravní tlak, aby bylo dosaženo požadovaných průtoků vzduchu pro každé nastavení tepelné pohody. Hluk je generován vzhledem k otáčkám ventilátoru, turbulentnímu proudění vzduchu v mísící jednotce, ztrátám v potrubí a ve vyústkách. Při navrhování systémů HVAC je velice důležité sladit co nejnižší hlučnost s optimalizací výkonu. Kompromisy mezi prouděním, tepelnými a akustickými vlastnostmi mohou mít za následek pozdější úpravy návrhu. [12, 13]



Obr. 7 Vliv geometrie HVAC na akustický výkon, upraveno z [12]

### Hluk od ventilátoru a rozdělovací jednotky

Hluk ventilátorů se nachází v celém frekvenčním pásmu a je rozdělován na tři základní složky, kde hlavní je aerodynamický hluk (kolísání dopravního množství, turbulentní proudění v mezní vrstvě, tvoření vírů za lopatkami, vnořování statorových nebo oběžných lopatek do turbulentního proudění), dále mechanický hluk (elektromotory, valivá ložiska, převody, nevyváženost otáčivých částí stroje apod.) a třetím s minimálním příspěvkem je hluk magnetický [7, 14, 15]. Radiální ventilátor vytváří hluk vzájemným působením oběžných lopatek se vzduchem dopadajícím na okolní statické součásti. Při styku nevyrovnaného rychlostního profilu



Obr. 8 Akustický výkon ventilátoru, upraveno z [12]

s tzv. jazykem ventilátoru dochází k tlakovým pulzům, jež se projevují vyzařováním akustické energie [16]. Tento hluk ventilátoru je akusticky šířený do kabiny vozidla prostřednictvím komplexní sítě vzduchovodů zakončenými výstřky. Akustický výkon ventilátoru je přímo úměrný druhé mocnině rychlosti [1]. Rozdělovací jednotka a potrubí generují aerodynamický hluk převážně rozdělením proudů a tvorbou vírů vyplívajících z turbulentního proudění a obtékání různých geometrických tvarů. Tento hluk je také akusticky šířený přes celý systém. [12]

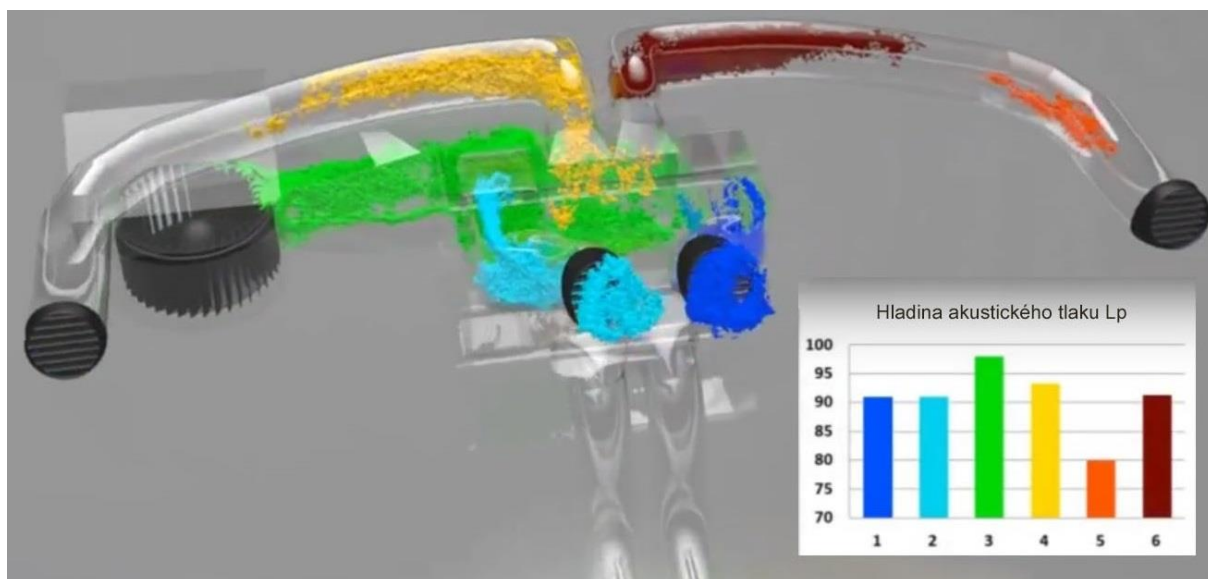
### Hluk vyvolaný prouděním média v přímých kanálech

Při zvýšení rychlosti na dvojnásobek vzroste podle vzorce č. 11 hladina akustického výkonu v kanále o 15 dB [7]. Avšak ve vzduchotechnickém systému automobilu je tento zdroj hluku oproti ostatním nepodstatný.

$$L_w = 10 + 50 \log w + 10 \log S \quad [\text{dB}] \quad (11)$$

$$L_{wA} = 6 + 50 \log w + 10 \log S \quad [\text{dB}] \quad (12)$$

Kde:  $w$ ...rychlost proudění vzduchu [m/s]  
 $S$ ...průřez potrubí [m<sup>2</sup>]



Obr. 9 Hladiny akustického tlaku pro jednotlivé zdroje hluku, upraveno z [12]

### Hluk tvořený v obloucích a kolenech

V kolenech a obloucích s  $r < 3d$  nastává při náhlé změně směru odtržení proudnic od stěn vzduchovodu a tím vznikají úplavy. Zvyšujícím zaoblením se stávají kolena a oblouky vhodnější z hlediska menší tlakové ztráty a lepších akustických vlastností. Kvůli snížení tlakové ztráty a odstranění úplav se do kolen a oblouků vkládají vodící lopatky. Podle vztahu 13 můžeme stanovit hladinu akustického výkonu v oktávovém pásmu pro příslušné koleno či oblouk. [1, 7]

$$L_{W0} = K_f + L_{sp} \quad [\text{dB}] \quad (13)$$



Kde:  $K_f$ ...korekce formulující tvar spektra (závislá na Strouhalově čísle) [dB]  
 $L_{sp}$ ...specifická hladina akustického výkonu (závislá na parametrech kolena) [dB]

$$L_{sp} = 50 \log w_c + 10 \log S + 10 \log(nl) \quad [\text{dB}] \quad (14)$$

Kde:  $w_c$ ...rychlost proudění v zúženém průřezu [m/s]  
 $S$ ...průřez potrubí [m<sup>2</sup>]  
 $n$ ...počet vodících lopatek [-]  
 $l$ ...délka tětiny lopatky [m]

Rychlost proudění vzduchu v zúženém průřezu je stanovena z místní tlakové ztráty podle vzorce č. 15. [7]

$$w_c = \frac{\dot{V}}{SK_\zeta} \quad [\text{m/s}] \quad (15)$$

Kde:  $\dot{V}$ ...proudící množství vzduchu [m<sup>3</sup>/s]  
 $K_\zeta$ ...konstanta, formulující vliv místní tlakové ztráty [-]

Pokud  $\zeta \neq 1$  
$$K_\zeta = \frac{(\sqrt{\zeta} - 1)}{\zeta - 1} \quad [-] \quad (16)$$

Pokud  $\zeta = 1$  
$$K_\zeta = 1 \quad [-] \quad (17)$$

Kde:  $\zeta$ ...součinitel místní tlakové ztráty [-]

$$K_f = 10 \log f_m - 13,5 - 7,69(\log Sh)^{2,5} \quad [-] \quad (18)$$

Kde:  $f_m$ ...střední frekvence v oktařovém pásmu [Hz]  
 $Sh$ ...Strouhalovo číslo [-]

$$Sh = \frac{fd}{w_c} \quad [-] \quad (19)$$

Kde:  $d$ ...šířka kolene [m]

### Hluk tvořený v klapkách [1, 7]

Klapky se do potrubí vkládají z důvodu regulace průtoku vzduchu nebo plného uzavření jednotlivých vzduchovodů. Jsou vyráběny jednolisté (jednoduché) nebo vícelisté, přičemž ve všech případech jsou klapky obtékány, což narušuje proudění vzduchu za klapkou a výrazně zvyšuje turbulenci, s čímž stoupá aerodynamický hluk. Hladina akustického výkonu v příslušném oktařovém pásmu se určuje obdobně jako u oblouků a kolien (nepopsané veličiny jsou stejné jako v předešlém textu).

$$L_{Wo} = L_{sp} + K_f \quad [\text{dB}] \quad (20)$$

$$L_{sp} = 50 \log w_c + 10 \log S_{kl} + 10 \log D \quad [\text{dB}] \quad (21)$$

Kde:  $D$ ...průměr klapky [m]  
 $S_{kl}$ ...jmenovitý průřez klapky [m<sup>2</sup>]

Rychlost proudění je možné určit ze vztahu č. 15. Pro jednolistou klapku pak platí závislost faktoru  $K_\zeta$  na místní tlakové ztrátě podle zde uvedených vzorců.

$$\text{Pokud } \zeta < 4 \quad K_\zeta = \frac{\sqrt{\zeta} - 1}{\zeta - 1} \quad [-] \quad (22)$$

$$\text{Pokud } \zeta > 4 \quad K_\zeta = 0,68\zeta^{-0,15} - 0,22 \quad [-] \quad (23)$$

Podobně pro vícelistou klapku platí následující rovnice.

$$\text{Pokud } \zeta = 1 \quad K_\zeta = 0,5 \quad [-] \quad (24)$$

$$\text{Pokud } \zeta \neq 1 \quad K_\zeta = \frac{\sqrt{\zeta} - 1}{\zeta - 1} \quad [-] \quad (25)$$

Korekce na tvar spektra se provede podle níže rozepsaných vzorců.

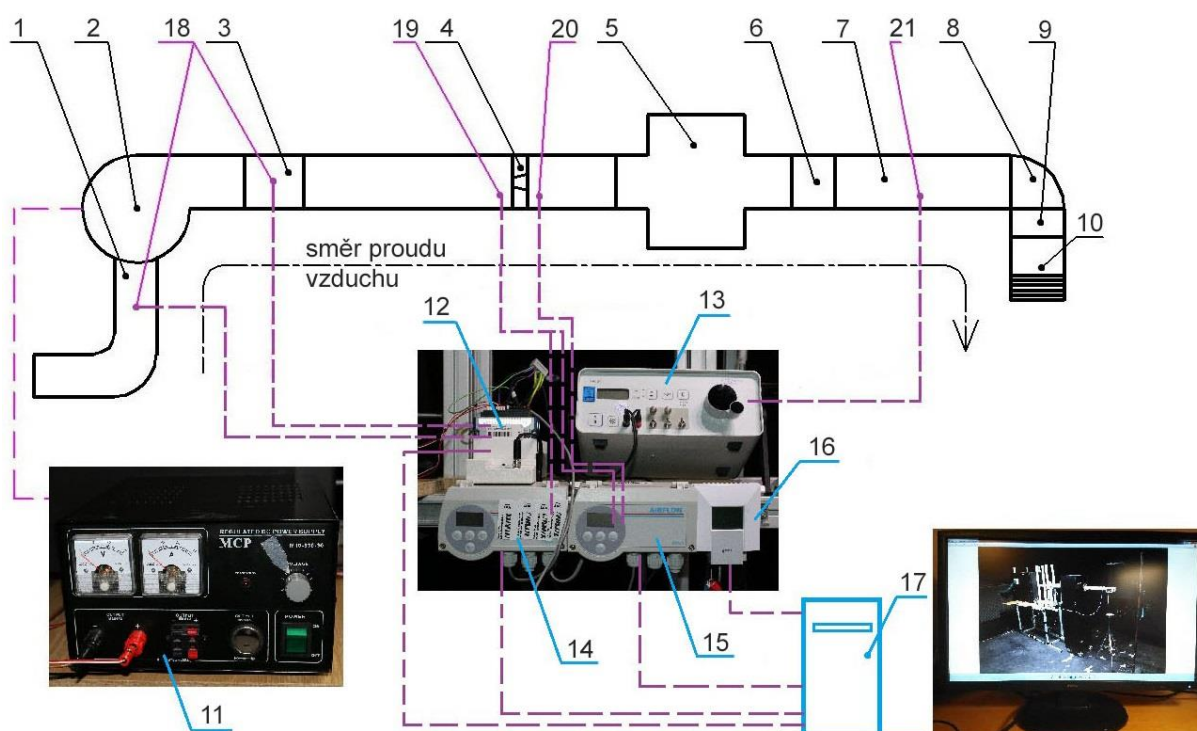
$$\text{Pro } Sh < 25 \quad K_f = 10 \log f_m - 10,7 \log Sh - 13 \quad [-] \quad (26)$$

$$\text{Pro } Sh > 25 \quad K_f = 10 \log f_m - 35,9 \log Sh + 22,2 \quad [-] \quad (27)$$

Kde:  $Sh$ ...Strouhalovo číslo stanovené pro výšku klapky  $D$  a rychlost  $w_c$  [-]

## 2 EXPERIMENTÁLNÍ ZAŘÍZENÍ

Experimentální měření probíhalo v laboratoři větrání na fakultě FSI VUT v Brně (označení místnosti je C3/213c). Měřicí trať simuluje vzduchotechnický systém v osobním automobilu, přičemž ho zjednodušuje a přizpůsobuje pro daná měření. Primárními částmi měřicí trati jsou ventilátor a vzduchovod s vyústkou (černě). Komponenty potřebné pro funkčnost a měření různých provozních veličin jsou zobrazeny pomocí obrázků a popsány níže.



Obr. 10 Schéma experimentálního zařízení

- 1 – sací potrubí, 2 – ventilátor, 3 – redukce, 4 – uklidňující potrubí s clonkou, 5 – absorpční tlumič hluku, 6 – redukce, 7 – přívodní vzduchovod, 8 – oblouk, 9 – uzavírací klapka, 10 – benchmarková vyústka, 11 – napájecí zdroj, 12 – modul pro měření teploty, 13 – micromanometr, 14 a 15 – převodník tlaku, 16 – modul pro měření teploty, barometrického tlaku a vlhkosti, 17 – počítač, 18 – senzory teploty Pt100, 19, 20 a 21 – tlakové odběry

### 2.1 MĚŘICÍ PŘÍSTROJE, SNÍMAČE A PŘÍSLUŠENSTVÍ

Zde jsou uvedeny měřicí přístroje, snímače a příslušenství potřebné pro další experimentální vyhodnocování:

- MCP M10-330-30 (zdroj napětí – mění střídavé síťové napětí 230 V na stejnosměrné regulované napětí)
- Airflow PTSXR (převodník tlaku 2× - pro měření rozdílů tlaků a následné dopočítání objemového průtoku)
- Comet T7418 (interiérový snímač teploty, vlhkosti a atmosférického tlaku)
- Pt100 (teplotní odporové čidlo 2× - měří ohřátí vzduchu ve ventilátoru)
- NI 9217 (vstupní analogový modul)

- NI 9215 (vstupní analogový modul)
- NI cDAQ-9172 (základna slotů – pro převod analogového signálu na digitální)
- PC obsahující program LabVIEW

## 2.2 ZVUKOMĚR 2270

Ruční analyzátor 2270 je další generací úspěšných a velice oblíbených analyzátorů 2250 a 2260, na jejichž základě je z velké části založen. Jedná se o pátou generaci přístroje od firmy Brüel & Kjær, která je s více než šedesátiletými zkušenostmi stále vyvíjena a vylepšována. Přístroj má velké množství funkcí a i navzdory tomu musí být lehce ovladatelný a manipulovatelný, což umožňuje použití barevné dotykové obrazovky. Záměr designu a konstrukce tohoto zařízení je okamžitě prezentovat a vyhodnotit výsledky měření uživateli přímo na měřeném místě bez nutnosti použití počítače. Zvukoměr 2270 poskytuje uživateli širokou škálu softwarových modulů včetně záznamu měřeného signálu, frekvenční analýzy a logování. [17, 18]

Analyzátor má k dispozici dva plně na sobě nezávislé měřicí kanály umožňující měření dvěma mikrofony na různých místech současně. Takové měření může výrazně ušetřit čas a např. při měření zvukové neprůzvučnosti či u verifikace účinnosti zvukových bariér jsou dva výstupy z analyzátoru nutností. [18]



Obr. 11 Zvukoměr 2270, upraveno z [17]

Vylepšením oproti předchozím verzím analyzátoru je vestavěná digitální kamera pro fotodokumentaci. Při měření lze foto připojit k protokolu, což je obrovským přínosem při

pozdějším zpracováváním protokolů. Analyzátor má možnost použití SDHC nebo CF paměťovou kartu. [17, 18]

Komunikace s ostatními zařízeními je zajištěna pomocí vysokorychlostního LAN nebo USB rozhraní. Přístroj lze přes tuto komunikaci umístit mimo dosah uživatele a ovládat na dálku. Ovládání na dálku je možné přes program BZ5503, který je dodáván s přístrojem nebo jej lze stáhnout z oficiálního webu firmy Brüel & Kjær. Tento program dále slouží k přenosu a zobrazení dat, exportu a archivaci. [17, 18]

*Vlastnosti:*

- *Frekvenční rozsah 3 Hz – 20 kHz*
- *Dynamický rozsah 120 dB*
- *Záznam zvuku*
- *Kamera*
- *USB rozhraní*
- *Odposlech*
- *Ukládání dat pro pozdější analýzu*
- *Možnost použití paměťových karet (SDHC, CF)*
- *Barevný dotykový displej s vysokým rozlišením*
- *Stupeň krytí IP44*
- *Vstupy na připevnění stativu nebo poutka*

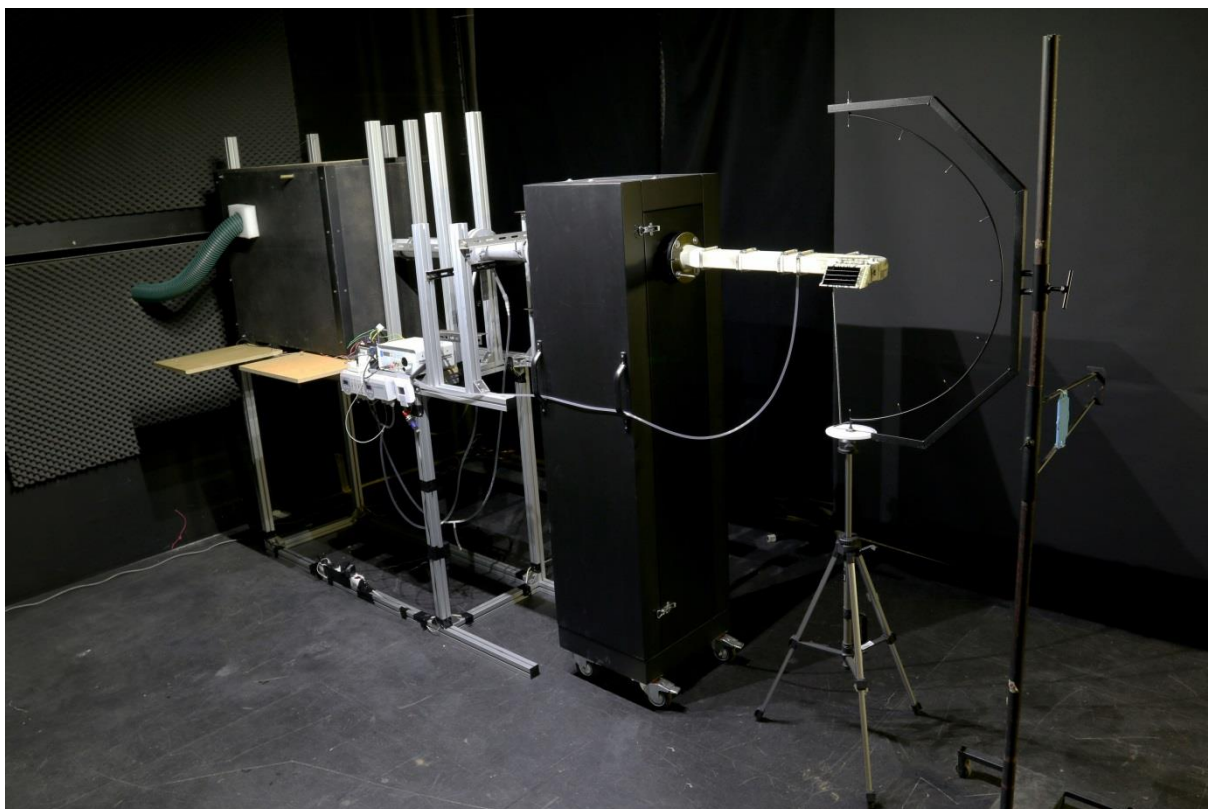
*Použití:*

- *Komplexní akustická měření*
- *Podrobné oktávové a třetinooktávové analýzy*
- *Doba dozvuku*
- *Výzkum a vývoj*
- *Odhadová schopnost úspěšně snižovat hluk*

## 2.3 VZDUCHOTECHNICKÉ KOMPONENTY, PŘÍSLUŠENSTVÍ

Kompletní měřicí trať je sestavená z komponentů, které jsou popsány v následujícím textu a vypsány zde:

- Sací hadice
- Ventilátor topení s rozdělovačem vzduchu 1K1 819 015
- Přečodka z rozdělovače vzduchu do uklidňovacího potrubí (vyrobena na ústavu FSI z materiálu ABS)
- Uklidňující potrubí s vyměnitelnými clonami (DN 65, PN 6 od firmy MATTECH s.r.o.)
- Absorpční komorový tlumič hluku (vyrobený na zakázku pro tento experiment)
- Přečodka z tlumiče hluku do vzduchovodu (vyrobena na ústavu Energetiky z materiálu ABS)
- Přívodní vzduchovod s benchmarkovou vyústkou (vyrobena na ústavu Energetiky z materiálu ABS)
- Úhломěr s vyznačeným rozložením měřicích bodů (vyrobena na ústavu Energetiky)

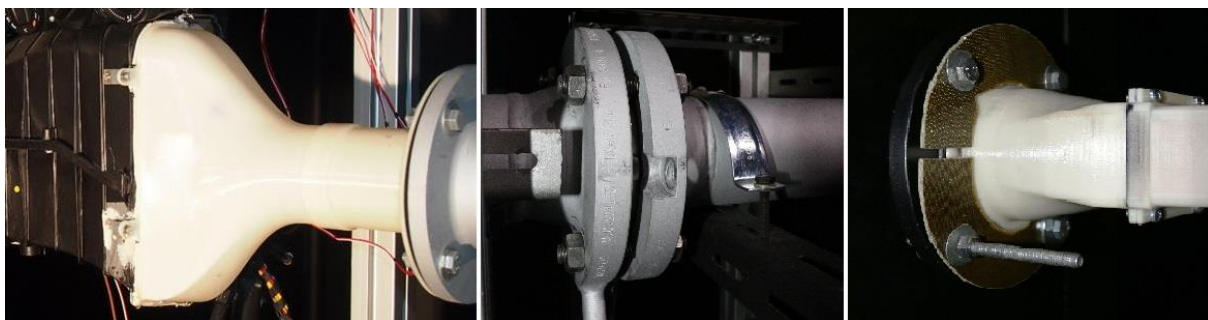


*Obr. 12 Kompletní měřicí trať*

Celá měřicí trať je postavena na nosném hliníkovém systému Alutec. Na obr. 12 je měřená trať již akusticky upravena. Ventilátor s rozvaděčem a přechodkami v původním stavu je na obr. 21 vlevo nahoře. Vzduch je nasáván přes zeď hadicí o průměru 55 mm lopatkovým ventilátorem, jenž je výrobkem od firmy ŠKODA AUTO a.s. Ventilátor je součástí rozvaděče upraveného pouze na jeden výstup.

Za rozvaděčem je napojeno uklidňovací potrubí sloužící k vyvinutí proudění vzduchu. Do tohoto potrubí je vložena clona, jež způsobuje tlakovou ztrátu, která je měřena dle příslušné normy (ČSN EN ISO 5167) a následně je dopočítáván objemový průtok. Za uklidňující potrubí je vložený absorpční kulísový tlumič hluku, jenž je konstrukčně vyrobený podle potřeb daného experimentu. Příruby jsou ve stejné výšce jako uklidňovací potrubí a vnitřní průměr je též shodný. Tlumič pohlcuje hluk a zabraňuje šíření aerodynamického i mechanického hluku od ventilátoru do vzduchovodu s vyústkou. Uklidňovací potrubí a tlumič mají kruhový průřez a jsou spojeny přechodkou s obdélníkovým průřezem vzduchovodu, který má zaoblené hrany a jeho průřez je  $3968,54 \text{ mm}^2$ . Vzduchovod, přechodky a komponenty vyústky jsou vyrobeny z plastu ABS na 3D tiskárně metodou Rapid Prototyping a jejich vnitřní plocha je modifikována povrchovou úpravou na požadovanou drsnost povrchu odpovídající reálnému vzduchovodu s vyústkou. Vzduchovod je složen ze šesti částí, z nichž jsou tři se stejnou délkou 145 mm, jeden 55 mm a úsek potrubí s uzavírací (regulační) klapkou má shodnou vzdálenost 55 mm. Systém obsahuje čtyři typy uzavíracích klapek (jednoduchá motýlková uzavírací klapka, dvojité motýlkové uzavírací klapka a dvě jednoduché motýlkové uzavírací klapky s upraveným tvarem pro plynulejší obtékání s minimálním ovlivněním proudu vzduchu). Mezi demontovatelné prvky vzduchovodu patří také oblouk s odnímatelnými usměrňovači proudu.





*Obr. 13 Přejídková z rozdělovače do uklidňujícího potrubí (vlevo), klona, Přejídková z kruhového průřezu na obdélníkový (vpravo), upraveno z [19]*

Sestavená benchmarková vyústka simuluje standardně používané automobilové vyústky a umožňuje široký výběr jednotlivých nastavení. Vyústka disponuje dvěma řadami nastavitelných lamel, z nichž přední mohou být horizontální, zadní vertikální a naopak. Počet lamel je volitelný v rozsahu od 3 do 6 ks. Lamely usměřují a znehybňují profilované šablony ze stejného materiálu. Rozsah horizontálních lamel je  $-25^\circ$  až  $45^\circ$  a lamel vertikálních  $-45^\circ$  až  $45^\circ$ . Přední a zadní řada má odlišný průřez lamel. Průřez vyústky bez lamel je  $3989,14 \text{ mm}^2$ .



*Obr. 14 Vzduchovod s benchmarkovou vyústkou*

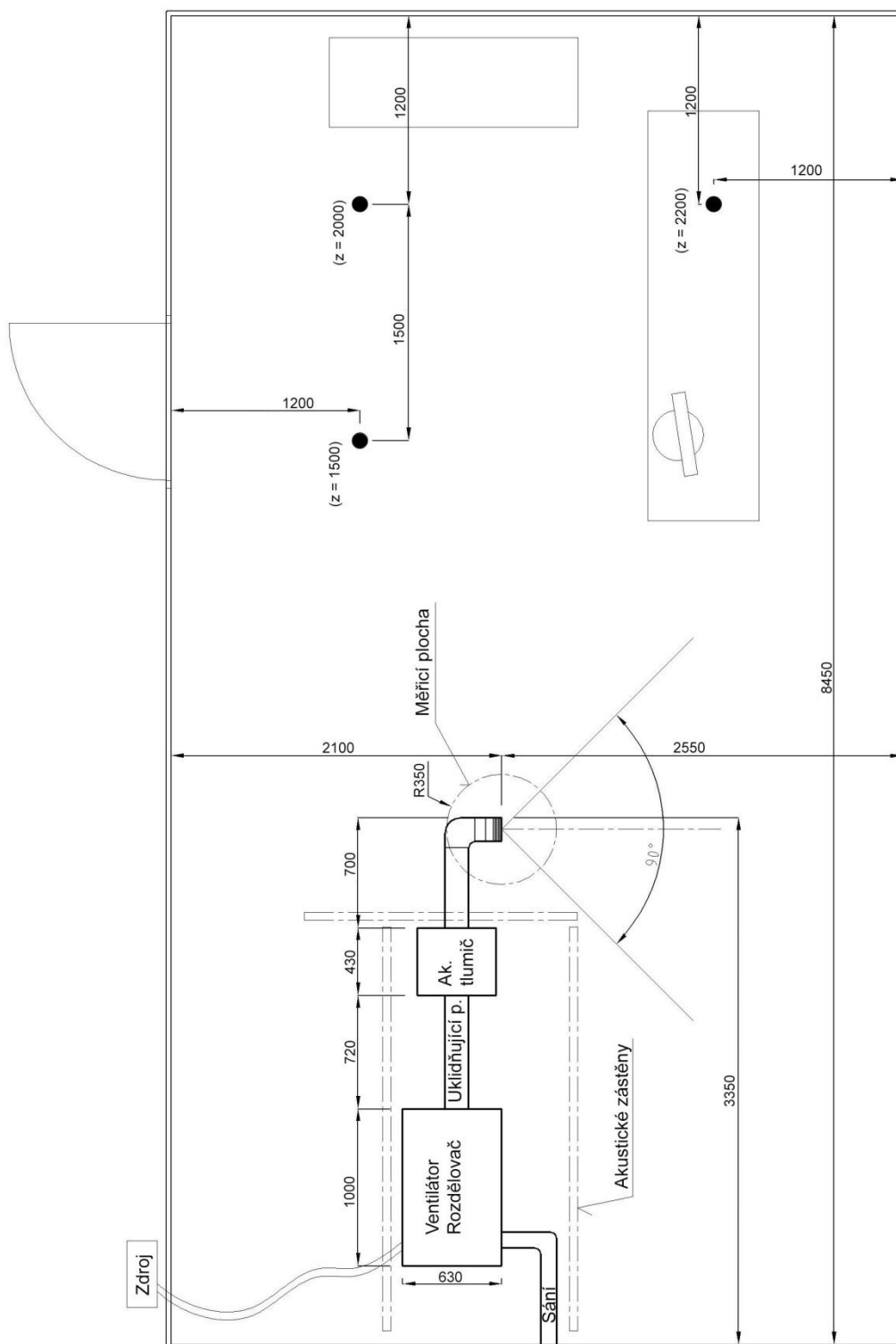
Dva experimenty byly provedeny na vyústce SK37 od firmy ŠKODA AUTO. Konkrétně se jedná o pravou ventilační vyústku z osobního automobilu Škoda Octavia III, viz obr. 15.



*Obr. 15 Interiér automobilu Škoda Octavia III, upraveno z [20]*

## 2.4 DISPOZICE LABORATOŘE

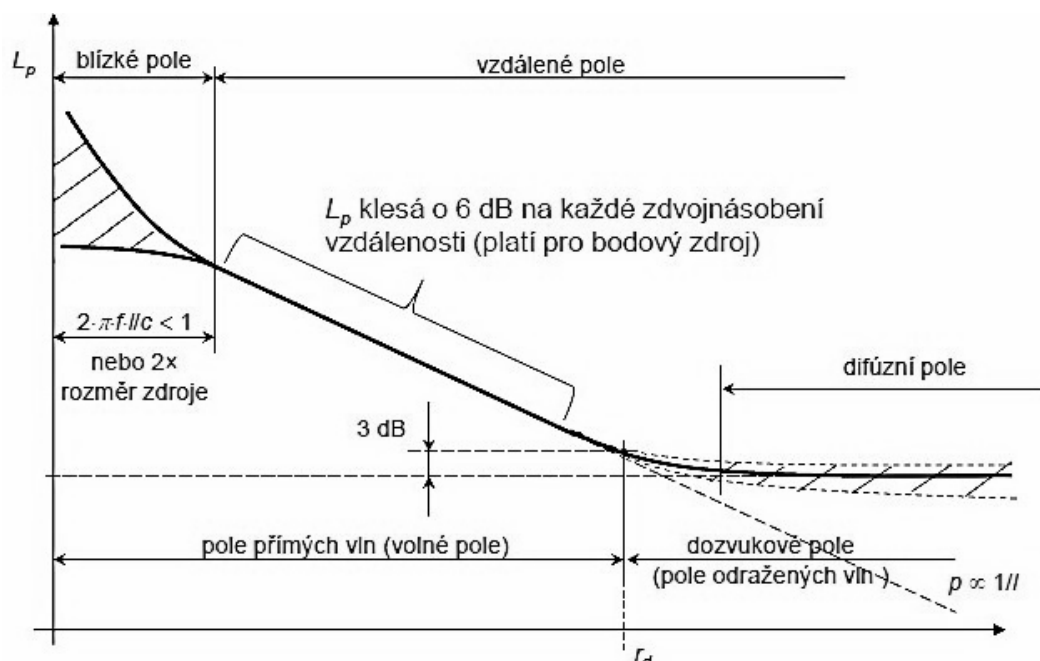
Na obr. 16 je zobrazený půdorys experimentální laboratoře, ve které probíhal experiment. Je zde vyznačena poloha a rozměry měřicí tratě v místnosti a zakreslena pozice třech měřených bodů akustického pozadí.



*Obr. 16 Půdorys experimentální laboratoře*



Měření bylo třeba provést ve volném poli (pole přímých vln) viz obr 17. Z toho důvodu bylo zapotřebí ověřit, ve kterém akustickém poli se měřené body nachází a případně upravit polohu měřicích bodů.



Obr. 17 Akustická pole, upraveno z [21]

Rozhraní mezi polem přímých a odražených vln určuje poloměr dozvuku, jenž lze vypočítat ze vzorce č. 28. [22]

$$r = \sqrt{\frac{A_n Q}{16\pi(1 - \alpha_s)}} \approx \sqrt{\frac{A_n Q}{16\pi}} \quad [\text{m}] \quad (28)$$

Kde:  $A_n$ ...celková pohltivost místnosti [ $\text{m}^2$ ]

$Q$ ...činitel směrovosti [-]

$\alpha_s$ ...součinitel pohltivosti [-]

Tab. 2 Dozvuková vzdálenost

Frekvence	f [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
Celková pohltivost	$A_n$ [-]	30,4	34,5	35,8	43,2	48,2	55,6
Poloměr dozvuku	$r_d$ [m]	1,56	1,66	1,69	1,85	1,96	2,10

V tab. 2 je ověřeno, že měření bodů na kulové ploše bylo provedeno v poli přímých vln. Maximální poloměr dozvuku vychází přibližně 2,1 m od stěn ve vysokých frekvencích. Činitel směrovosti byl volen 4, protože vyústka směřuje proud jedním směrem, se kterým jsou spojeny i nejvyšší hodnoty hladin akustických tlaků.

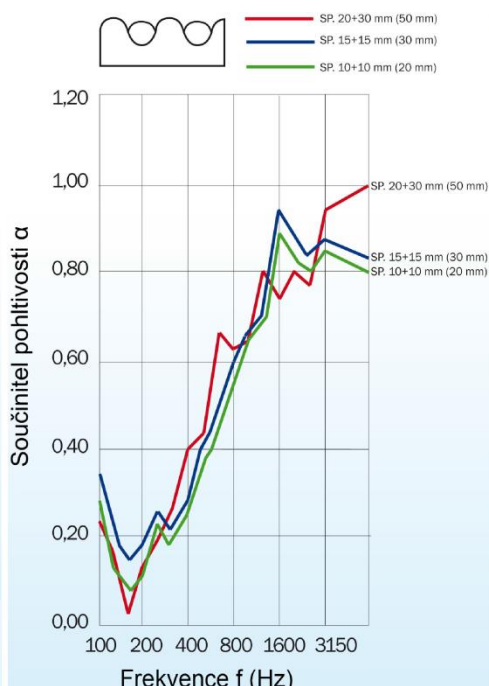
### 3 NÁVRH A PROVEDENÍ AKUSTICKÝCH ÚPRAV MÍSTNOSTI A ZKUŠEBNÍHO ZAŘÍZENÍ

Laboratoř větrání, ve které probíhalo měření, nebyla uzpůsobena pro hlukové experimenty a měřená trať při provozu vyzařovala vysoké hodnoty hluku. Z toho důvodu bylo potřeba vytvořit určitá opatření pro zvýšení celkové pohltivosti místnosti a speciálně upravit měřicí trať, což je popsáno v této kapitole.

#### 3.1 ODHLUČNĚNÍ MÍSTNOSTI

Místnost, kde bylo provedeno měření, disponuje délkou 8,45 m, šířkou 4,65 m a výškou 3,2 m. Stěny a strop jsou z dřevotřísky o tloušťce 1,5 cm a jedna ze stěn je částečně ze skla. Dřevotříska a především sklo mají špatnou akustickou pohltivost, tudíž bylo zapotřebí provést taková opatření, aby byla celková pohltivost v místnosti zvětšena.

Na strop a stěny byly přilepeny akustické porézní panely Rockfonik a dále byly též rozmístěny v prostoru, kde vytvářejí akustické zástěny. Materiál je pěnový pružný polyuretan na polyesterové bázi, samozhášecí typ s bublinkovým profilem. Princip pohlcování zvuku je založený na přeměně zvukové energie třením v teplo při průchodu zvukové vlny póry materiálu. Na rubové straně je samolepící vrstva pro jednodušší upevnění na konstrukce. Panely se vyrábějí s tloušťkou 2 až 7 cm a spolehlivě pohlcují vysokofrekvenční hluk. [23], [24]



Obr. 18 Akustické panely rockfonik, upraveno z [24]

Část akustického výkonu dopadajícího na stěnu se vrátí do prostoru a část druhá je pohlcena nebo projde na druhou stranu stěny. Poměr mezi pohlceným akustickým výkonem  $P_a$  k dopadajícímu  $P$  vyjadřuje činitel zvukové pohltivosti  $\alpha$ . Tento činitel musí být kladný a jeho maximální hodnota je 1.

Tab. 3 Hodnoty činitele pohltivosti materiálů a konstrukcí v místnosti, upraveno z [25]

Konstrukce	Kmitočet [Hz]					
	125	250	500	1000	2000	4000
Dřevotřísková deska	0,28	0,25	0,15	0,08	0,05	0,04
Podlaha	0,02	0,03	0,03	0,07	0,04	0,04
Rockfonik materiál	0,19	0,19	0,45	0,65	0,80	0,95
Zasklený otvor	0,30	0,20	0,15	0,10	0,06	0,04

### Doba dozvuku

Doba dozvuku  $T$  [s] neboli doznívání je čas, během kterého se sníží intenzita zvuku o 60 dB po vypnutí zdroje zvuku. [1]

Doba dozvuku lze naměřit experimentálně nebo vypočítat ze Sabinova vztahu [5]

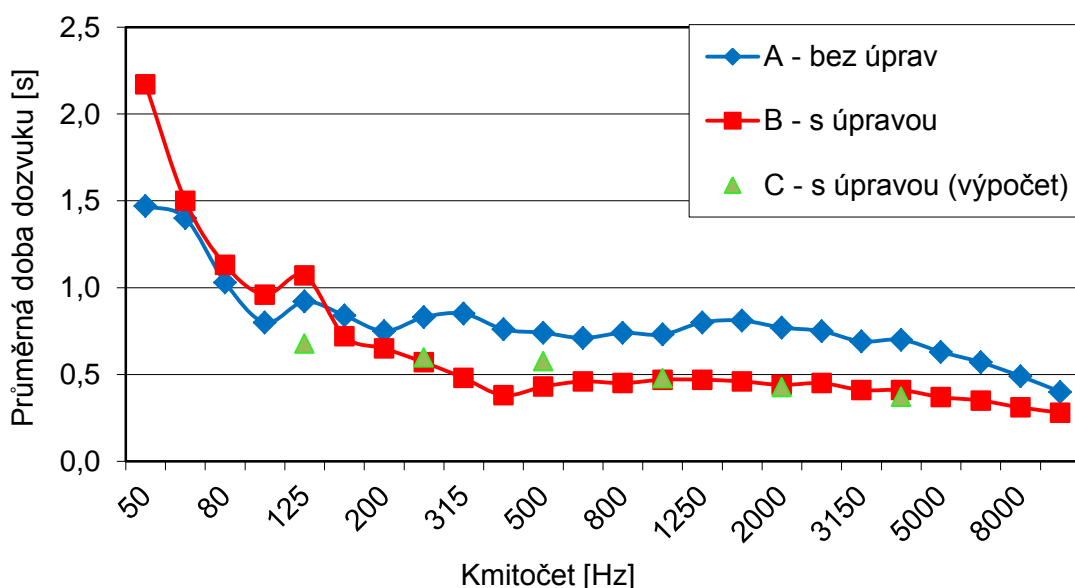
$$T_s = 0,164 \frac{V}{A} \quad [\text{s}] \quad (29),$$

kde  $V$  [m<sup>3</sup>] se rozumí objem místnosti,  $A$  [m<sup>2</sup>] je celková zvuková pohltivost, která se stanoví [5] dle rovnice

$$A = \sum_{i=1}^n \alpha_i S_i + \sum n A_k \quad [\text{m}^2] \quad (30),$$

kde  $n$  zastupuje počet osob,  $A_k$  je pohltivost jednoho člověka,  $\alpha_i$  je činitel akustické pohltivosti materiálu pro povrchy konstrukcí (viz tab. 3) a  $S_i$  jsou plochy povrchů konstrukcí. Pohltivost osob je důležitá v prostorách s velkou koncentrací lidí, ale v případě tohoto měření je osoba pouze jedna, tudíž ji lze zanedbat [5].

### Kmitočtová závislost průměrné doby dozvuku



Obr. 19 Doba dozvuku v laboratoři

Objem sledované místnosti je  $V = 126 \text{ m}^3$ . Doba dozvuku v laboratoři byla měřena před a po provedení akustických úprav. Tyto hodnoty byly následně vyneseny do grafu na obr. 19 v příslušných třetinooktávových pásmech. Kvůli ověření pravosti měření byl proveden výpočet doby dozvuku pro akusticky upravenou místnost ve vybraných kmitočtech. Hodnoty naměřené a vypočtené zmíněným způsobem jsou srovnatelné. Hodnota pro prázdnou místnost bez všech zařízení podle vzorce č. 29 vyšla  $T_{s1(1000)} = 1,6 \text{ s}$  a pro upravenou místnost s rozmístěnými panely Rockfonik vyšla doba dozvuku  $T_{s2(1000)} = 0,48 \text{ s}$ .

Při měření doby dozvuku experimentálně se obvykle měří pokles pouze o 10, 20 nebo 30 dB a potom se extrapoluje čas na pokles o 60 dB. Měření zde bylo prováděno analyzátozem typu 2270 od firmy Brüel & Kjær popsáním v podkapitole č. 2.2. V místnosti bylo vybuzeáno přibližně 110 dB akustického tlaku. Při porovnání hodnot vypočítaných a experimentálně naměřených je zřejmé, že po úpravě akustickými materiály vycházejí téměř shodně a pohybují se okolo  $T_{s2} = 0,49 \text{ s}$ . Doba dozvuku před akustickými úpravami vyšla výpočtem 1,6 s a z grafu na obr. 19 pro naměřené hodnoty lze odečíst dobu 0,8 s. Tento rozdíl je způsoben faktem, že výpočetně bylo uvažováno s prázdnou místností, zatímco měření probíhalo v plně vybavené místnosti se všemi měřicími zařízeními, stoly apod. Z grafu je dále patrné, že tlumení nízkofrekvenčního hluku je výrazně složitější.

Tab. 4 Výpočet doby dozvuku pro frekvenci 1000 Hz, upraveno z [25]

Materiál	$\alpha_i$	Bez úpravy		S úpravou	
	$f=1000 \text{ [Hz]}$	$S \text{ [m}^2\text{]}$	$A \text{ [m}^2\text{]}$	$S \text{ [m}^2\text{]}$	$A \text{ [m}^2\text{]}$
Dřevotřísková deska	0,080	111,1	8,9	69,1	5,5
Podlaha	0,065	39,3	2,6	39,3	2,6
Rockfonik materiál	0,650	0,0	0,0	54,0	35,1
Otvor zasklený	0,100	12,0	1,2	0,0	0,0
Celkem		162,4	12,6	162,4	43,2

Celkový součinitel pohltivosti potřebný pro další výpočty vyšel  $\alpha = 0,3$ . Avšak vlivem dodatečných akustických úprav bylo dále počítáno s hodnotou  $\alpha = 0,35$ . Dodatečné akustické úpravy oddělují ventilátor od měřeného prostoru.

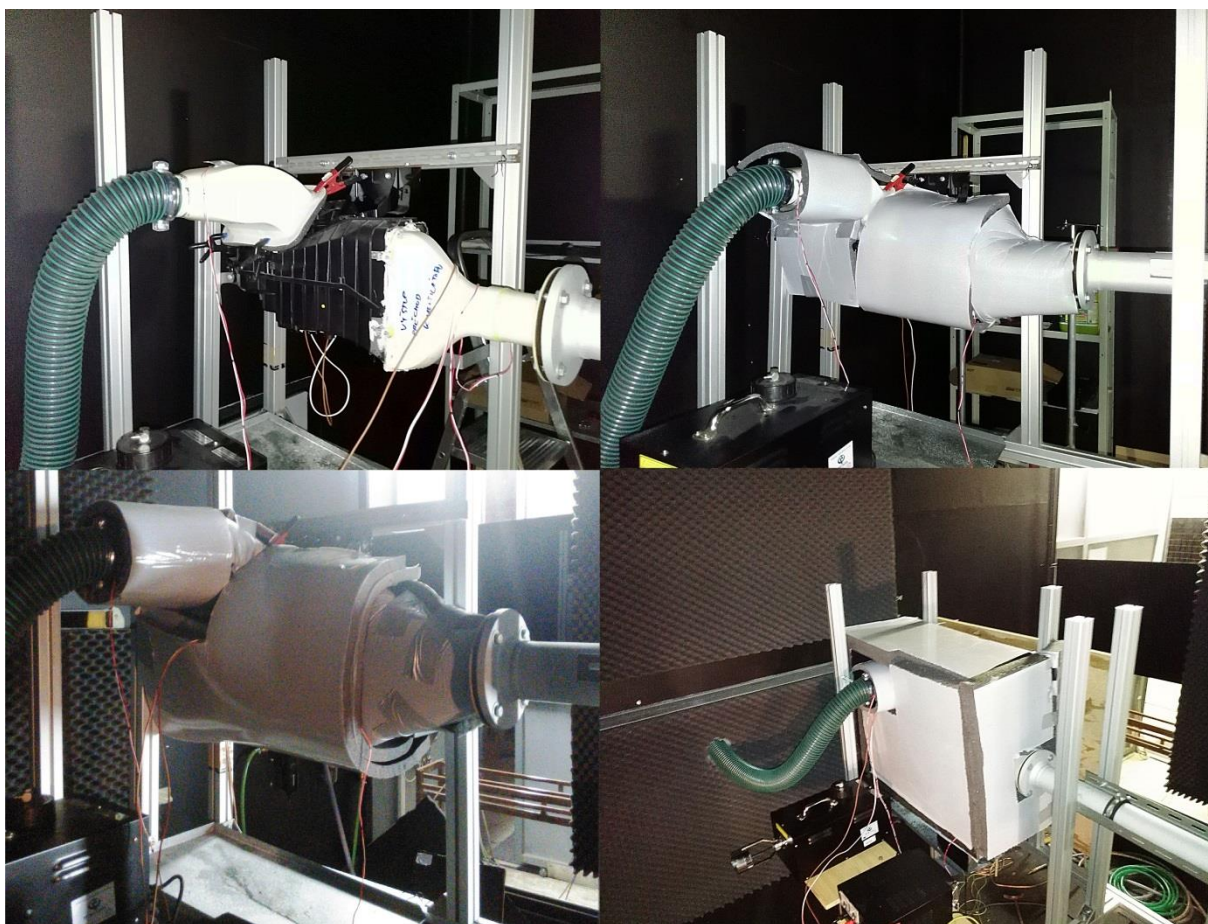


Obr. 20 Akustické zástěny



### 3.2 ODHLUČNĚNÍ MĚŘICÍ TRATĚ

V původním stavu vydávala vzduchotechnická trať několikanásobně vyšší hluk než sledovaná vyústka. Pro jeho snížení bylo potřeba provést určitá opatření. Jednoznačně největší zdrojem hluku byl radiální ventilátor, na který byl vytvořen akustický kryt. Akustický kryt byl vytvořen z pohltivých materiálů Rockfonik a povrchová úprava z dřevotřískových desek. První a druhá vrstva byla obložena z tvarovatelných tenkých desek tloušťky 2 cm, na niž byla nainstalována další vrstva ve tvaru krychle s deskami o tloušťce 5 cm.



Obr. 21 Akustický kryt

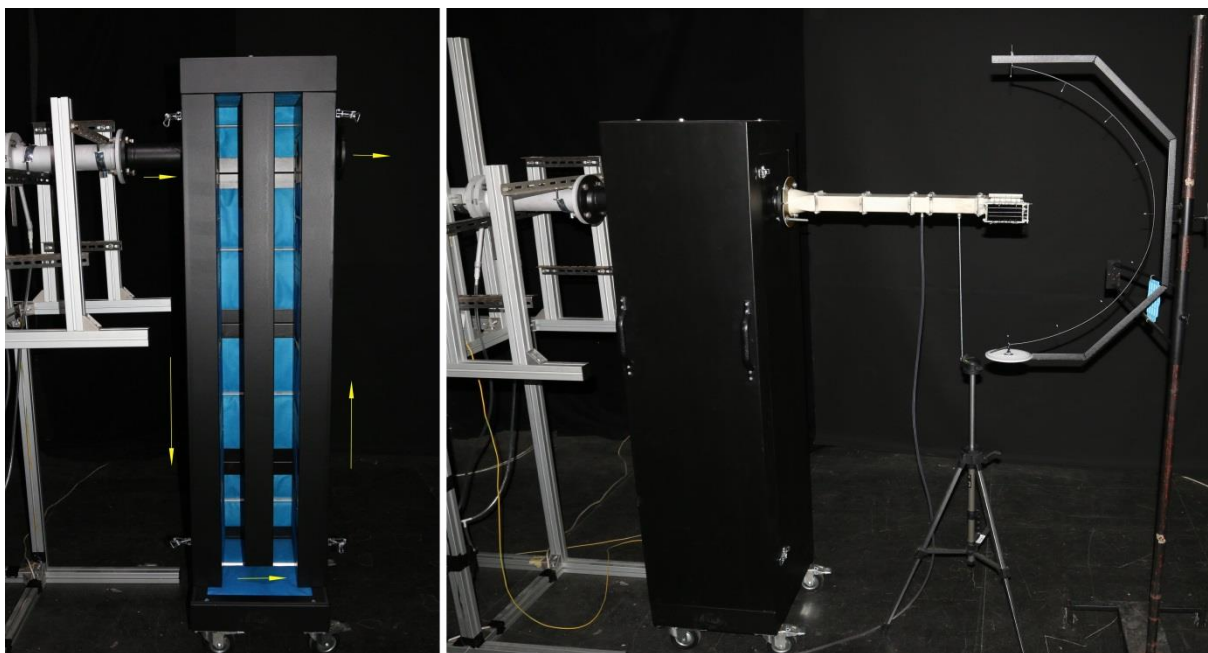
Další důležitou úpravou bylo vyvedení sání ventilátoru přes zeď ven z místnosti hadicí tvrzenou spirálou, jak je zřejmé z obr. 21 vpravo dole. Zdroj energie byl také vyveden z místnosti, protože má z důvodu chlazení svůj vlastní axiální ventilátor, který je zdrojem hluku. Ze stejného důvodu bylo za potřeby po nastavení hodnoty průtoku vypínat stolní počítač.

Tab. 5 Rozdíl hlučnosti vyústky s absorpčním tlumičem a bez

Varianta		Korekce průměrných hodnot	
		$L_w$ [dB]	$L_{wA}$ [dB]
BM_5H5V_1BV_STR_Q33_MM	Bez tlumiče	56,2	48,0
	S tlumičem	55,0	32,1
Rozdíl		1,3	16,0

Z důvodu potlačení šíření hluku vlastním potrubím byl na míru vyroben absorpční tlumič, jenž byl vkládán do potrubí a upevňován přírubami. Tento tlumič spolehlivě potlačil hluk šířící se potrubím od ventilátoru nebo též např. hluk aerodynamického původu tvořící se při obtékání škrťací clony, podle níž nastavujeme požadovaný průtok. Nevýhodou tohoto tlumiče jsou velké rozměry, hmotnost a tlaková ztráta. Z důvodu lepší pohyblivosti je vybaven pojezdovými kolečky. Cesta proudu vzduchu skrz tlumič je znázorněna šipkami na obr. 22. Porovnání naměřeného hluku s tlumičem a bez něj je uvedeno v tab. 5.

Měření proběhlo se stejnými parametry a ukázalo se, že v celém frekvenčním spektru bez některého z filtrů klesla hladina akustického tlaku i výkonu pouze o 1,3 dB. Po přizpůsobení lidskému uchu filtrem A vyšel rozdíl 16 dB, což je značně vysoká hodnota ukazující na kvalitu a důležitost vloženého absorpčního komorového tlumiče. Podrobnější analýza tohoto testu je provedena v podkapitole 8.1.



*Obr. 22 Absorpční komorový tlumič hluku*

## 4 METODIKA MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ DAT

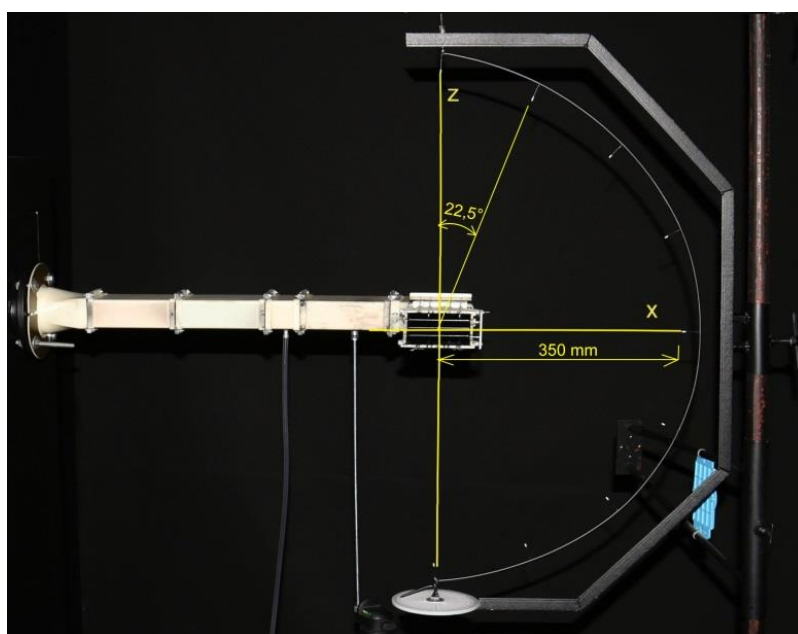
Tato kapitola pojednává o provozním nastavení měřicí trati a odladění měřicí metodiky. Dále je možné se zde seznámit s jednotlivými měřeními konstrukčními variantami.

### 4.1 PROVOZNÍ NASTAVENÍ MĚŘÍCÍ TRATI

Na experimentální trati bylo měřeno více testů souběžně. Z toho důvodu byla trať často upravována podle příslušné potřeby měření, tudíž bylo vždy před měřením potřeba zkontrolovat stav tratě a popřípadě provést potřebné úpravy.

Úpravy byly následující:

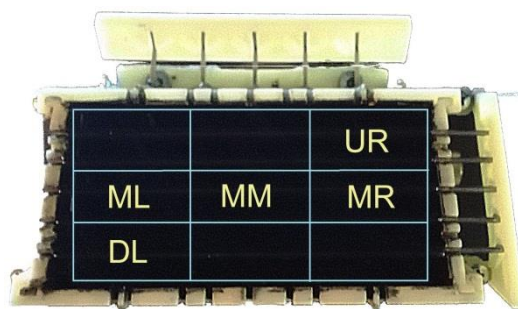
- 1) Kontrola dispozičního umístění tratě v laboratoři
- 2) Umístění zdroje napětí ven z měřené místnosti
- 3) Vyvedení sání ventilátoru přes zeď
- 4) Výměna příslušné clony pro měřený průtok v uklidňujícím potrubí
- 5) Nainstalování absorpčního tlumiče do potrubí
- 6) Připojení vzduchovodu s vyústkou
- 7) Nastavení požadované konstrukční varianty vyústky (viz podkapitola č. 4.2)
- 8) Obložení a oddělení tratě od sledované vyústky akustickými panely (vytvoření akustických zástěn viz obr. 20)
- 9) Nastavení směru lamel na MM (střed střed)
- 10) Nastavení objemového průtoku na požadovanou konstantní hodnotu  $Q_V = 33,5 \text{ m}^3/\text{h}$  nebo  $Q_V = 80,6 \text{ m}^3/\text{h}$  (průtok je upravován před změnou konstrukční varianty pouze před prvním nastavením směru lamel MM)
- 11) Vycentrování os úhloměru s vyznačenými body měření (osy úhloměru procházejí těžištěm výstupní plochy vyústky neboli středem vyústky, viz obr. 23)



Obr. 23 Úhloměr

## 4.2 VARIANTY NASTAVENÍ VYÚSTEK

Všechny varianty jsou naměřeny při dvou různých průtocích vzduchu a zároveň v pěti základních uživatelských nastaveních lamel vyústky, které jsou zřejmé z obr. 24. Nižší průtok je nastavován na hodnotu  $Q_V = 33,5 \text{ m}^3/\text{h}$  (Q33) a vyšší na  $Q_V = 80,6 \text{ m}^3/\text{h}$  (Q80). Výkon ventilátoru měníme regulováním napětí na zdroji, čímž se mění i průtok. Při seřízení objemového průtoku na požadovaný musí být vložena náležitá clona pro tento průtok v ukladňovacím potrubí. V programu LabVIEW, který poskytuje grafické prostředí pro návrh měřicích a regulačních systémů, sledujeme změnu veličiny v reálném čase.



Obr. 24 Nastavení směru proudění

Jedna z variant je měřena na originální vyústce s přívodním potrubím z vozu SK37 (Škoda Octavia III).

Ostatní varianty jsou měřeny na benchmarkové vyústce s odlišným nastavením lamel a proměnnými komponenty. Na sledované vyústce jsou prováděny různé experimenty, jež budou později vzájemně porovnávány, a proto je velice důležité sjednocení označení jednotlivých variant. Za ukázkové označení je vybrána konstrukční varianta vyústky BM\_5H5V\_1BV\_STR\_Q80, na níž budou popsána jednotlivá značení. BM je zkratka pro benchmarkovou (sestavenou, zkušební) vyústku. Další symboly popisují počet a umístění lamel, což v konkrétním případě znamená **5** Horizontálních lamel vepředu (blíže do větraného prostoru) a **5** Vertikálních lamel vzadu (blíže vzduchovodu). Zvýrazněné symboly vždy označují polohu lamel směrem k větranému prostoru. Pouze v jednom případě je v popisu páté písmeno (N) označující použití zadních vertikálních lamel s rozdílným průřezem, než je standardní. Uzavírací klapky jsou celkem tři a na jedné z nich jsou měřeny dvě varianty (1BVR a 1BVS).

Uzavírací klapky:


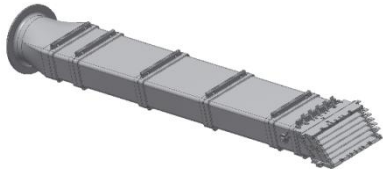

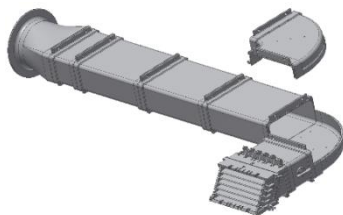

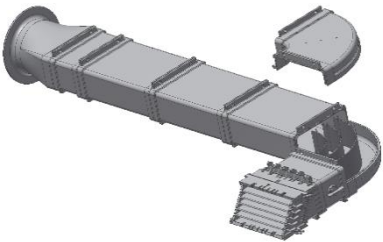

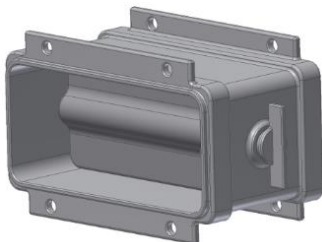

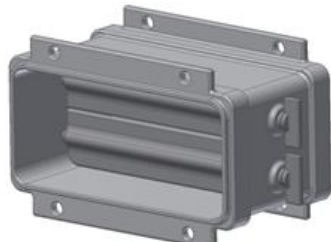

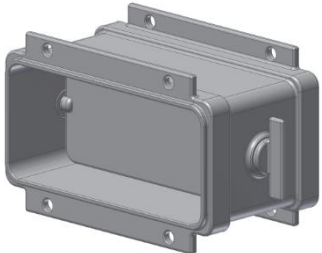

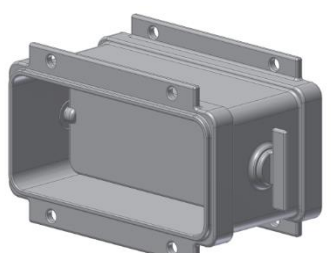
- uzavírací jednoduchá motýlková klapka (1BV – butterfly valve)
- uzavírací dvojité motýlkové klapky (2BV)
- uzavírací tenkostěnná klapka se zaoblenou náběžnou hranou (1BVR - radius)
- uzavírací tenkostěnná klapka se skosenou náběžnou hranou pod úhlem  $45^\circ$  (1BVS - sharp)

Další možností výměny je měření s rovným vzduchovodem (STR) nebo s vložením kolena do potrubí (BD). V jedné z variant jsou do kolena vloženy tzv. usměrňovače proudu (BDTV – turning vanes).


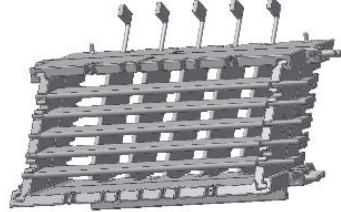



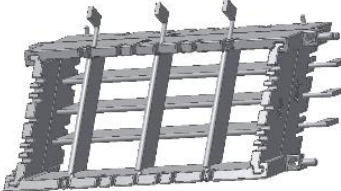



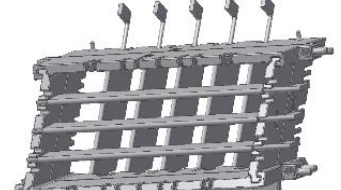


Měření probíhalo na patnácti různých variantách vyústek. Jejich výčet je možné nalézt v tab. 7, při dvou různých objemových průtocích vzduchu. Všechny varianty byly naměřeny v pěti vybraných nastaveních směrovacích lamel. Celkově tudíž bylo provedeno 150 měření.



Tab. 6 Vyměnitelné části vzduchovodu, upraveno z [19]

Zkratka a schematická značka	Popis a obrázek	Zkratka a schematická značka	Popis a obrázek
STR 	Přímý vzduchovod 	BD 	Vzduchovod s kolenem (90°) 
BDTV 	Vzduchovod s kolenem (90°) a usměrňovači proudu 		
1BV 	Uzavírací jednoduchá motýlková klapka (zaoblené hrany) 	2BV 	Uzavírací dvojitá motýlková klapka (zaoblené hrany) 
1BVR 	Uzavírací tenkostěnná klapka se zaoblenou náběžnou hranou 	1BVS 	Uzavírací tenkostěnná klapka se skosenou náběžnou hranou pod úhlem 45° 

Pokračování tab. 6, upraveno z [19]

<p>5H5V</p> 	<p>Usměrňovací lamely v pořadí 5x horizontální a 5x vertikální ve směru z kabiny</p> 		
<p>3V3H</p> 	<p>Usměrňovací lamely v pořadí 3x vertikální a 3x horizontální ve směru z kabiny</p> 		
<p>3H5VN</p> 	<p>Usměrňovací lamely v pořadí 3x horizontální a 5x vertikální nové ve směru z kabiny</p> 		

Tab. 7 Seznam variant

Vyústka	Uspořádání lamel	Uzavírací klapka	Koleno/přímé potrubí
SK37	-	-	-
BM	5H5V	1BV	STR
	5H5V	2BV	
	5H5V	1BVR	
	5H5V	1BVS	
	5H5V	1BV	BD
	3H5V		BD
	3H5VN		BD
	5 3V		BD
	3H3V		D
	5H5V		BDTV
	5V5H		BD
	3V5H		BD
	5V3H		BD
	3V3H		BD

Tab. 8 Vybrané směrování lamel

Značka	Popis
UR	Nahoře vpravo ( <i>up right</i> )
MR	Střed vpravo ( <i>medium right</i> )
MM	Střed střed ( <i>medium medium</i> )
ML	Střed vlevo ( <i>medium left</i> )
DL	Dole vlevo ( <i>down left</i> )

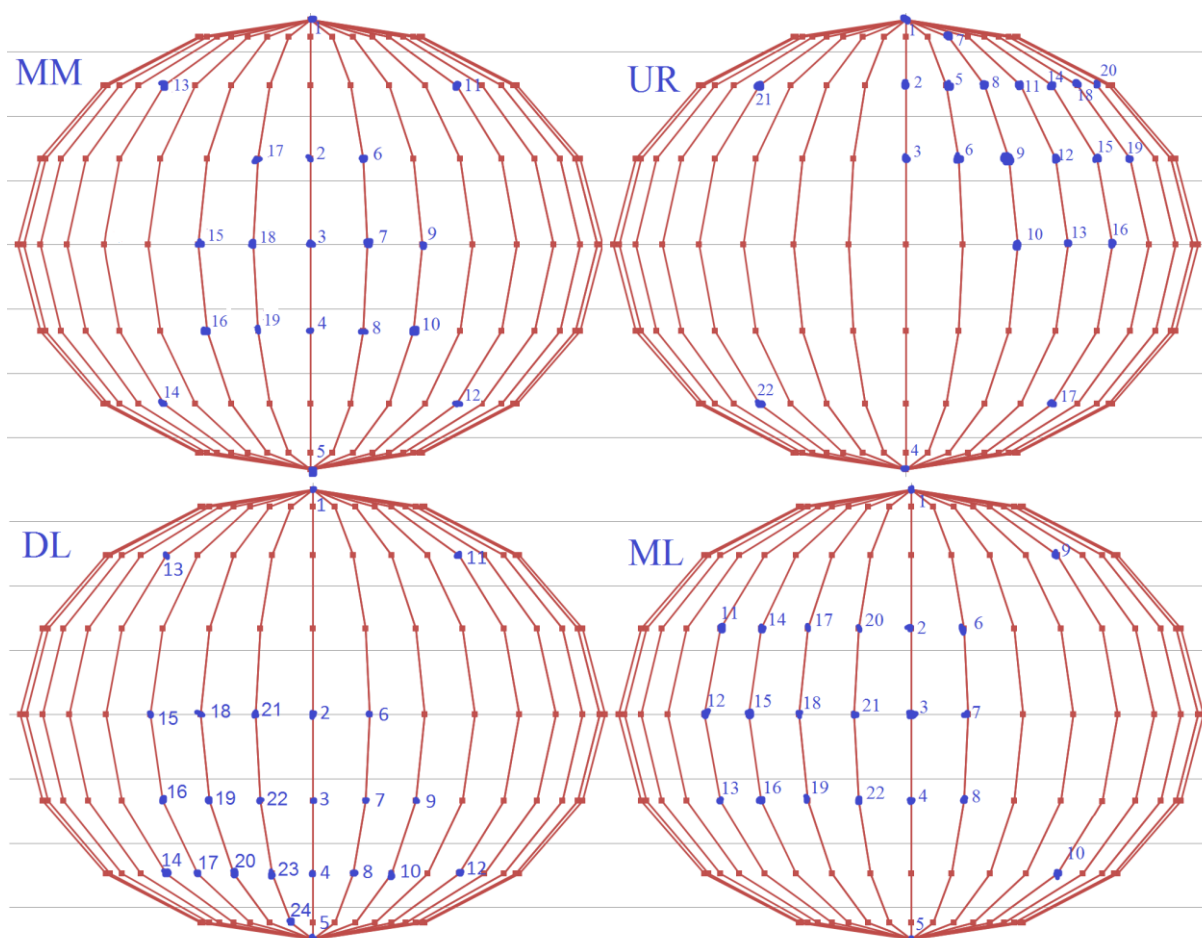
### 4.3 ROZLOŽENÍ A STANOVENÍ OBLASTI MĚŘÍCÍCH BODŮ

Za měřicí plochu byla zvolena koule s těžištěm ve středu přední plochy vyústky. Jedná se o speciální experimentální měření, kde byly počet a vzdálenost bodů od středu voleny na základě zkušeností z mnoha předešlých pokusů.

Při předběžných testech bylo měřeno ve všech bodech na kouli, kde bylo 16 poledníků po devíti bodech. První a devátý bod na poledníku se měřil pouze jednou a celkový počet měřených bodů tedy činil 114. Jeden bod byl měřen po dobu 20 s, což bylo velice zdoluhavé. Na základě těchto předešlých testů na více variantách vyústek bylo zjištěno, že hodnoty akustických tlaků zadní polokoule odpovídají nejnižším hodnotám na přední polokouli, a proto tyto body lze dopočítávat. Zadní polokoule tedy odpovídá průměru nejmenších naměřených hodnot na přední polokouli.

Z předešlých pokusů bylo zjištěno, že 16 poledníků je příliš hrubý rastr a je potřeba jej zjemnit. Zjemnění bylo důležité především kvůli oblasti proudu vzduchu, kde jsou naměřeny jednoznačně nejvyšší hodnoty akustického tlaku. Přešlo se tudíž na 32 poledníků s 9 (7) body, což je celkem 226 bodů. Body musejí být rovnoměrně rozloženy z důvodu použití vizualizační metody v programu Tecplot, viz podkapitola 7.4.1.

V dalším kroku byla provedena redukce co nejvíce bodů pro všechna nastavení lamel. Z předchozích testů měření bylo zjištěno, že body v přední polokouli, které leží mimo proud vzduchu, mají podobné akustické vlastnosti. Tyto body zároveň příliš neovlivňují celkové výsledky hlučnosti vyústek, a proto je tedy možné měřit pouze některé z nich a ostatní analogicky dopočítávat. Naopak body, které leží v proudu vzduchu, musejí být měřeny



Obr. 25 Rozložení bodů na měřicí ploše

všechny z důvodu velkého vlivu na celkovou hlučnost. Vymezování bodů v oblasti proudění probíhalo s využitím zvukoměru a termoanemometru.

Po optimalizaci rozložení a počtu bodů byly jednotlivé body pro příslušné nastavení lamel měřeny v přesně stanoveném pořadí od 1 výše, což je zjevné z obr. 25. Na tomto obrázku však chybí nastavení MR, jenž je stejné jako ML, pouze zrcadlově obrácené.

#### 4.4 STANOVENÍ HLADINY AKUSTICKÉHO VÝKONU

Po dokončení měření byla data stažena do PC ve formátu xlsx, v němž byla dále zpracovávána. Hodnoty, se kterými se následně pracuje, jsou získány pro každý měřený bod ve všech třetinooktávových pásmech a jsou značena *LANCPB4*. Tato data jsou efektivní hladiny akustického tlaku. Podle vzorců 31 - 35 jsou počítány hladiny akustického tlaku a výkonu, jež charakterizují hlučnost celé vyústky. [26, 27, 28]

Hladina akustického výkonu vážená filtrem A:

$$L_{wA} = \overline{L_{pA}} + 10 \log \left( \frac{S_k}{S_0} \right) \quad [\text{dB}] \quad (31)$$

Kde:  $S_k$ ...měřicí kulová plocha obklopující vyústku [ $\text{m}^2$ ]  
 $S_0 = 1$  [ $\text{m}^2$ ]

$$S = 4\pi r^2 \quad [\text{m}^2] \quad (32)$$

Kde:  $r$ ...poloměr kulové plochy od středu vyústky [m]

Průměrná hladina akustického tlaku A na měřicí ploše s korekcemi na pozadí a prostředí:

$$\overline{L_{pA}} = \overline{L_{pA}'} - K_1 - K_2 \quad [\text{dB}] \quad (33)$$

Průměrná hladina akustického tlaku A na měřicí ploše:

$$\overline{L_{pA}'} = 10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{0,1L'_i} \right) \quad [\text{dB}] \quad (34)$$

Průměrná hladina akustického tlaku A pozadí na měřicí ploše:

$$\overline{L_{pA}''} = 10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{0,1L''_i} \right) \quad [\text{dB}] \quad (35)$$

Výpočty a jednotlivé korekce byly vypočítány podle mezinárodní normy ČSN ISO 3746 stanovující výpočet hladiny akustického výkonu provozní metodou. Tato norma požaduje splnění určitých podmínek kladených na prostředí, kde se zdroj hluku nachází. [29]

Korekce musejí splňovat určité požadavky:  $K_1 \leq 3$ ,  $K_2 \leq 7$

**Korekce na pozadí  $K_1$ :** [29]

$$K_1 = -10 \log(1 - 10^{-0,1\Delta\bar{L}}) \quad [\text{dB}] \quad (36)$$

$$\Delta\bar{L} = \overline{L_{pA}'} - \overline{L_{pA}''}$$

Akustické pozadí bylo měřeno ve třech bodech (viz obr. 16), které ležely v části místnosti, kde se nenacházely významné zdroje hluku. Z těchto bodů byl následně vypočítán aritmetický průměr.

**Korekce na prostředí  $K_2$ :** [29]

$$K_2 = 10 \log \left[ 1 + 4 \left( \frac{S}{A} \right) \right] \quad [\text{dB}] \quad (37)$$

Kde:  $A$ ...pohltivost zvuku v místnosti [ $\text{m}^2$ ]

$$A = \bar{\alpha} S_v \quad [\text{m}^2] \quad (38)$$

Kde:  $S_v$ ...celková plocha ohraničující místnost [ $\text{m}^2$ ]  
 $\alpha$ ...střední činitel pohltivosti (0,35) [-]

Střední činitel pohltivosti byl výrazně zvýšen akustickými úpravami popsány v kapitole 3.

$$S_v = 2(ab + ac + bc) \quad [\text{m}^2] \quad (39)$$

Kde:  $a = 8,5 \text{ m}$ ,  $b = 4,65 \text{ m}$ ,  $c = 3,2 \text{ m}$

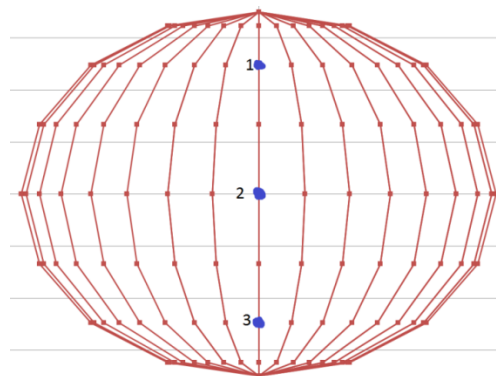
## 4.5 VOLBA KRYTU NA MIKROFON

Některé měřené body leží v silném proudění vzduchu, což by bez použití vhodného krytu na mikrofonu způsobovalo nadměrně zvýšené hodnoty akustického tlaku. Ruch od větru na mikrofonu je převážně zastoupen v nízkých frekvencích, které jsou velice dobře potlačovány použitím váhového filtru A.

Test byl proveden se čtyřmi odlišnými variacemi, kde byl použit základní kryt na mikrofon (4189 – ½-palcový do volného pole s rozsahem 6,3 Hz až 20 kHz), tentýž mikrofon s kulovým krytem (UA-0237) a poslední se špičkou (UA-0386) určenou do proudu vzduchu. Varianta s kulovým krytem byla měřena s korekcí pro tento kryt a se základním nastavením bez korekce. Každá z obměn byla měřena na konstrukční variantě výústky BM\_5H5V\_1BV\_BD\_Q80\_MM ve třech bodech zobrazených na obr. 26. Body 1 a 3 neležely v proudu vzduchu, a proto jsou zde hodnoty se všemi kryty přibližně shodné.

Tab. 9 Test krytů na mikrofon

Barva v grafu /typ	Pořadí	$L_p$ [dB]	$L_{pA}$ [dB]
Koule s korekcí (UA-0237)	1.	60,6	52,7
	2.	65,7	51,9
	3.	60,5	51,6
Koule bez korekce (UA-0237)	1.	60,2	52,9
	2.	65,6	52,4
	3.	61,1	51,9
Základní kryt (4189)	1.	61,7	54,3
	2.	90,4	65,4
	3.	61,2	52,1
Špička (UA-0386)	1.	60,1	52,4
	2.	78,	54,8
	3.	60,8	51,8



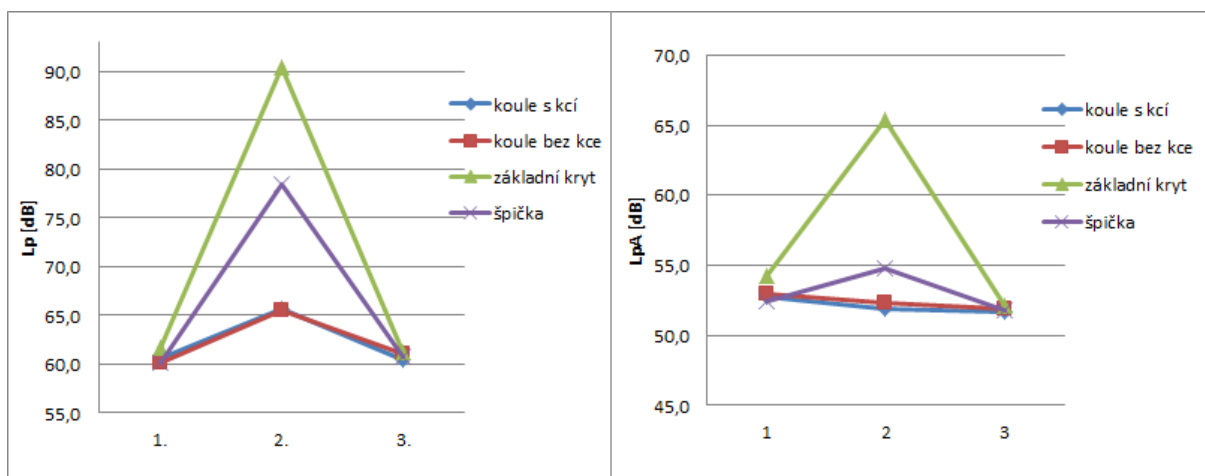
Obr. 26 Umístění měřených bodů

Bod 2 leží v přímém proudění vzduchu a jsou zde mezi jednotlivými variantami naměřeny poměrně značné rozdíly hladin akustických tlaků. Varianty koule s korekcí a bez ní vyšly totožně, z čehož je zřejmé, že nastavení korekcí pro tento kryt nemá významný vliv na výsledky měření. Tyto koule jsou vyrobené z polyuretanové pěny s otevřenými póry a tlumí hluk větru o 10 až 12 dB [30]. V grafu na obr. 27 lze vidět, že hladina  $L_{pA}$  v proudě vzduchu u koule v bodě 2 je zcela utlumena na hodnotu okolních bodů.

V tomto experimentu je aerodynamický hluk unášený proudem vzduchu sledován, a proto je zde kulový kryt (UA-0237) nevhodné použít.

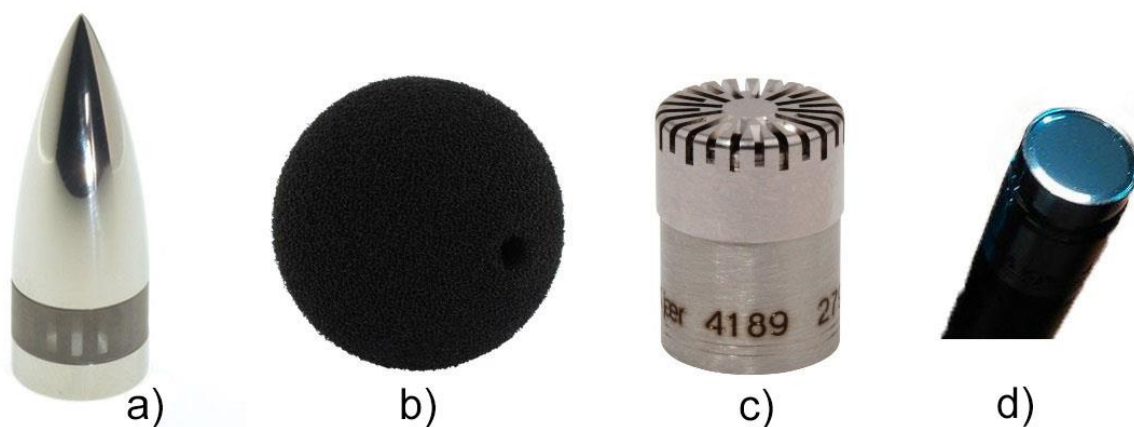
Hodnoty akustických tlaků měřené mikrofonem se základním krytem (4189) vyšly jednoznačně nejvyšší. Vysoké hodnoty jsou zde z důvodu tvorby hluku při obtékání neaerodynamického složitěho tvaru krytu. Tento hluk necharakterizuje sledovanou výústku, ale je tvořen až v těsné blízkosti mikrofonu, a tudíž je tento kryt také nevyhovující.

Kryt ve tvaru špičky (UA-0386) má aerodynamický tvar a je určený pro měření v proudě vzduchu. Z grafu na obr. 27 je patrné, že hodnoty akustického tlaku v bodě 2 pro špičku vycházejí v rozmezí mezi dalšími zkoušenými kryty. Rozdíl mezi špičkou a koulí vychází  $L_p = 12,7 \text{ dB}$  a  $L_{pA} = 2,9 \text{ dB}$ . Pokud o tyto rozdíly snížíme nejvyšší hodnotu ze všech bodů měřené výústky, klesnou celkové průměrné hladiny akustického tlaku výústky  $L_p$  o 1,3 dB a  $L_{pA}$  o 0,1 dB, z čehož je zřejmé, že volba krytu je důležitá především pro nízké frekvence bez váhového filtru A.



Obr. 27 Grafy testovaných krytů

UA-0386 (kuželový kryt) je používán v případech, kdy je mikrofon vystaven vysoké rychlosti vzduchu ve známém směru. Jedná se o rychlosti až 20 m/s s nižší turbulentností a malým zkrutem proudu vzduchu. Přední část je aerodynamická ve tvaru komolého kužele s vysoce leštěným povrchem pro minimální odpor proti proudění vzduchu. Tím je dosaženo snížení hluku vznikajícího v přítomnosti samotného mikrofonu. Jemným drátěným pletivem je docíleno přenosu akustického tlaku na membránu mikrofonu. Tento kryt byl vybrán na základě provedeného testu a deklarovaných vlastností výrobcem jako nejvhodnější pro tento experiment. [31, 32]



Obr. 28 Kryty na mikrofon: a) UA-0386, b) UA-0237, c) 4189 základní kryt, d) membrána mikrofonu, upraveno z [30, 31]

## 5 NEJISTOTY MĚŘENÍ

Nejistoty měření hladin akustického výkonu  $u(L_W)$  se odhadují v souladu s mezinárodní normou [37] pomocí celkové směrodatné odchylky  $\sigma_{tot}$ .

$$u(L_W) \approx \sigma_{tot} \quad [\text{dB}] \quad (40)$$

### 5.1 CELKOVÁ SMĚRODATNÁ ODCHYLKA

Celkovou směrodatnou odchylku  $\sigma_{tot}$  lze vyjádřit prostřednictvím směrodatné odchylky reprodukovatelnosti  $\sigma_{RO}$  a směrodatné odchylky  $\sigma_{omc}$ , která charakterizuje nejistotu vzniklou nestabilitou provozu a podmínkami upevnění zkoušeného zdroje hluku podle vzorce č. 41. [29, 37]

$$\sigma_{tot} = \sqrt{\sigma_{RO}^2 + \sigma_{omc}^2} \quad [\text{dB}] \quad (41)$$

### 5.2 SMĚRODATNÁ ODCHYLKA NESTABILITY

Směrodatná odchylka  $\sigma_{omc}$  zahrnuje nejistotu související s nestabilitou provozu a nestabilitou podmínek upevnění pro konkrétní zdroj hluku. Je možno ji určit z opakovaných měření jednoho zdroje stejnou osobou na stejném místě pomocí shodného měřicího zvukoměru a ve stejných polohách mikrofonu. Tato odchylka lze vypočítat podle vzorce 42. Měření jsou korigována na hluk pozadí. [37]

$$\sigma_{omc} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (L_{pj} - L_{pav})^2} \quad [\text{dB}] \quad (42)$$

Kde:  $N$ ...počet měření [-]

$L_{pj}$ ...hladina akustického tlaku měřená v předepsané poloze [dB]

$L_{pav}$ ...hladina aritmetického průměru vypočítaná pro tato opakování [dB]

Pokud se akustický výkon s časem mění jen málo nebo nemění, může být využita pro směrodatnou odchylku hodnota 0,5 dB. V případě kolísání je používána hodnota 2 dB a v extrémních případech silného kolísání akustického tlaku se používá hodnota 4 dB. [37]

### 5.3 SMĚRODATNÁ ODCHYLKA REPRODUKOVATELNOSTI

Tato odchylka je značena  $\sigma_{RO}$  a jsou zde zahrnuty nejistoty způsobené odlišným měřicím vybavením, odlišným postupem měření nebo různými vyzařovacími charakteristikami zkoušeného zdroje. Směrodatnou odchylku reprodukovatelnosti lze určit z mezilaboratorní porovnávací zkoušky nebo modelovým přístupem. Mezilaboratorní zkoušky zaručují provedení měření odlišnými osobami s odlišnými měřicími přístroji a na jiných místech. Matematické modelování zahrnuje dílčí nejistoty, kterými jsou např. korekce na hluk prostředí, vzdálenost mikrofonu od zdroje, parametry nejistot přístrojů nebo nejistoty polohy mikrofonů. Výpočet modelovým přístupem se provádí podle vztahu č. 43. [37]



$$\sigma_{RO} = \sqrt{\sum_i (c_i u_i)^2} \quad [\text{dB}] \quad (43)$$

## 5.4 ROZŠÍŘENÁ NEJISTOTA MĚŘENÍ

Rozšířená nejistota měření  $U$  je počítána dle rovnice 44 a závisí na požadovaném stupni konfidence. Pro normální rozdělení naměřených hodnot a konfidenční úroveň 95 % je činitel rozšíření  $k = 2$ . [37]

$$U = k * \sigma_{tot} \quad [\text{dB}] \quad (44)$$

## 5.5 STANOVENÍ NEJISTOT MĚŘENÍ

Nejistoty byly vypočítány podle již zmíněné mezinárodní normy [37]. Směrodatná odchylka  $\sigma_{omc}$  byla zvolena 0,5 dB, protože se u tohoto měření jedná o malé změny akustického tlaku v měřeném intervalu.

Směrodatná odchylka reprodukovatelnosti byla stanovena modelovým přístupem podle vzorce č. 43 a bylo zde uvažováno s měřicí metodou  $u_{method}$ , vzdáleností mikrofonu od zdroje  $u_s$ , korekcí na hluk pozadí  $u_{K1}$ , korekcí na prostředí  $u_{K2}$ , zvukoměrem  $u_{sim}$ , vzorkováním  $u_{mic}$  (počet poloh mikrofonu) a úhlem  $u_{angle}$  (nejistota související s úhlem dopadu akustické energie). Směrodatná odchylka reprodukovatelnosti následně vyšla  $\sigma_{RO} = 1,3$  dB.

Celková směrodatná odchylka činí  $\sigma_{tot} = 1,4$  dB a rozšířená nejistota měření je rovna  $U = 2,9$  dB. Příklad zápisu nejistot pro variantu SK37\_Q80\_MM ilustruje rovnice č. 45.

$$L_{WA} = (49,9 \pm 2,9) \quad [\text{dB}] \quad (45)$$

## 6 NAMĚŘENÁ DATA

V této části práce jsou tabulky s vypočítanými hodnotami hlučnosti jednotlivých vyústek.

Tab. 10 Výsledky z naměřených hodnot

SK37					BM_5H5V_1BV_STR				
Sm.	Průtok 33,5 m <sup>3</sup> /h		Průtok 80,6 m <sup>3</sup> /h		Sm.	Průtok 33,5 m <sup>3</sup> /h		Průtok 80,6 m <sup>3</sup> /h	
	L <sub>W</sub>	L <sub>WA</sub>	L <sub>W</sub>	L <sub>WA</sub>		L <sub>W</sub>	L <sub>WA</sub>	L <sub>W</sub>	L <sub>WA</sub>
	[dB]	[dBA]	[dB]	[dBA]		[dB]	[dBA]	[dB]	[dBA]
UR	59,4	37,2	72,1	51,6	UR	61,3	38,2	77,8	58,3
MR	55,6	35,4	70,9	52,1	MR	60,0	37,4	76,9	56,5
MM	55,1	37,2	72,3	49,9	MM	56,5	35,9	71,3	48,7
ML	54,6	35,2	68,8	51,8	ML	60,4	36,4	77,4	56,9
DL	55,2	36,1	67,2	53,2	DL	64,2	42,2	83,6	65,7
BM_5H5V_2BV_STR					BM_5H5V_1BVR_STR				
Sm.	Průtok 33,5 m <sup>3</sup> /h		Průtok 80,6 m <sup>3</sup> /h		Sm.	Průtok 33,5 m <sup>3</sup> /h		Průtok 80,6 m <sup>3</sup> /h	
	L <sub>W</sub>	L <sub>WA</sub>	L <sub>W</sub>	L <sub>WA</sub>		L <sub>W</sub>	L <sub>WA</sub>	L <sub>W</sub>	L <sub>WA</sub>
	[dB]	[dBA]	[dB]	[dBA]		[dB]	[dBA]	[dB]	[dBA]
UR	63,0	40,2	77,0	56,9	UR	62,3	39,3	76,9	56,4
MR	61,3	37,3	76,5	53,4	MR	60,9	37,9	75,8	54,1
MM	57,5	36,6	72,4	51,3	MM	57,2	36,6	74,8	49,0
ML	61,4	38,4	75,5	54,7	ML	61,5	37,8	76,5	55,2
DL	67,5	46,0	76,8	58,1	DL	67,1	45,7	76,5	58,2
BM_5H5V_1BVS_STR					BM_5H5V_1BV_BD				
Sm.	Průtok 33,5 m <sup>3</sup> /h		Průtok 80,6 m <sup>3</sup> /h		Sm.	Průtok 33,5 m <sup>3</sup> /h		Průtok 80,6 m <sup>3</sup> /h	
	L <sub>W</sub>	L <sub>WA</sub>	L <sub>W</sub>	L <sub>WA</sub>		L <sub>W</sub>	L <sub>WA</sub>	L <sub>W</sub>	L <sub>WA</sub>
	[dB]	[dBA]	[dB]	[dBA]		[dB]	[dBA]	[dB]	[dBA]
UR	62,0	39,1	76,9	56,4	UR	63,2	38,4	79,1	60,1
MR	60,6	37,7	75,8	54,1	MR	61	36,6	77,8	59,1
MM	56,9	36,4	74,8	49,0	MM	57,2	35,7	76,0	55,9
ML	61,2	37,6	76,5	55,2	ML	60,9	37,3	80,5	61,3
DL	66,8	45,5	76,5	58,2	DL	66,6	43,9	80,6	62,0
BM_3H5V_1BV_BD					BM_5H5VN_1BV_BD				
Sm.	Průtok 33,5 m <sup>3</sup> /h		Průtok 80,6 m <sup>3</sup> /h		Sm.	Průtok 33,5 m <sup>3</sup> /h		Průtok 80,6 m <sup>3</sup> /h	
	L <sub>W</sub>	L <sub>WA</sub>	L <sub>W</sub>	L <sub>WA</sub>		L <sub>W</sub>	L <sub>WA</sub>	L <sub>W</sub>	L <sub>WA</sub>
	[dB]	[dBA]	[dB]	[dBA]		[dB]	[dBA]	[dB]	[dBA]
UR	56,9	34,4	72,5	50,4	UR	61,9	36,9	75,8	57,5
MR	58,7	35,3	73,5	56,3	MR	58,3	35,3	73,8	53,0
MM	55,3	34,4	72,2	49,7	MM	57,1	35,1	74,2	52,5
ML	58,9	35,6	73,8	53,4	ML	59,2	35,6	75,6	54,0
DL	61,4	36,4	76,8	57,2	DL	64,5	41,2	75,3	60,4

Pokračování tab. 10

BM_5H3V_1BV_BD					BM_3H3V_1BV_BD				
Sm.	Průtok 33,5 m <sup>3</sup> /h		Průtok 80,6 m <sup>3</sup> /h		Sm.	Průtok 33,5 m <sup>3</sup> /h		Průtok 80,6 m <sup>3</sup> /h	
	L <sub>W</sub>	L <sub>WA</sub>	L <sub>W</sub>	L <sub>WA</sub>		L <sub>W</sub>	L <sub>WA</sub>	L <sub>W</sub>	L <sub>WA</sub>
	[dB]	[dBA]	[dB]	[dBA]		[dB]	[dBA]	[dB]	[dBA]
UR	60,6	35,3	74,2	52,0	UR	58,9	35,0	70,5	48,1
MR	55,6	34,0	74,1	55,8	MR	55,8	33,9	71,8	49,6
MM	56,9	34,4	75,1	55,9	MM	54,0	33,5	69,7	49,9
ML	57,4	33,8	75,7	53,1	ML	56,1	34,1	72,5	48,9
DL	62,4	38,5	70,3	53,3	DL	57,2	34,3	73,2	51,6
BM_5H5V_1BV_BDTV					BM_5V5H_1BV_BD				
Sm.	Průtok 33,5 m <sup>3</sup> /h		Průtok 80,6 m <sup>3</sup> /h		Sm.	Průtok 33,5 m <sup>3</sup> /h		Průtok 80,6 m <sup>3</sup> /h	
	L <sub>W</sub>	L <sub>WA</sub>	L <sub>W</sub>	L <sub>WA</sub>		L <sub>W</sub>	L <sub>WA</sub>	L <sub>W</sub>	L <sub>WA</sub>
	[dB]	[dBA]	[dB]	[dBA]		[dB]	[dBA]	[dB]	[dBA]
UR	60,1	37,0	71,0	45,5	UR	56,7	34,9	71,9	48,9
MR	59,9	35,4	75,2	55,2	MR	56,8	34,7	72,7	48,7
MM	56,9	33,1	70,9	49,4	MM	57,7	36,2	71,7	49,7
ML	58,6	34,7	75,2	54,2	ML	58,2	34,6	72,6	48,6
DL	64,2	40,5	75,4	54,7	DL	65,1	40,1	74,3	56,6
BM_3V5H_1BV_BD					BM_5V3H_1BV_BD				
Sm.	Průtok 33,5 m <sup>3</sup> /h		Průtok 80,6 m <sup>3</sup> /h		Sm.	Průtok 33,5 m <sup>3</sup> /h		Průtok 80,6 m <sup>3</sup> /h	
	L <sub>W</sub>	L <sub>WA</sub>	L <sub>W</sub>	L <sub>WA</sub>		L <sub>W</sub>	L <sub>WA</sub>	L <sub>W</sub>	L <sub>WA</sub>
	[dB]	[dBA]	[dB]	[dBA]		[dB]	[dBA]	[dB]	[dBA]
UR	59,1	35,1	63,4	43,6	UR	59,9	35,5	71,3	49,7
MR	56,6	34,0	70,2	48,2	MR	56,2	33,9	71,6	46,2
MM	54,8	33,7	70,1	48,4	MM	55,9	33,7	70,8	48,8
ML	56,6	34,1	71,8	47,1	ML	56,4	33,8	72,6	47,7
DL	65,4	40,8	75,4	57,3	DL	62,5	37,6	73,0	53,5
BM_3V3H_1BV_BD									
Sm.	Průtok 33,5 m <sup>3</sup> /h		Průtok 80,6 m <sup>3</sup> /h						
	L <sub>W</sub>	L <sub>WA</sub>	L <sub>W</sub>	L <sub>WA</sub>					
	[dB]	[dBA]	[dB]	[dBA]					
UR	59,6	35,3	74,3	61,5					
MR	56,6	33,9	71,7	47,7					
MM	55,4	33,9	72,0	48,9					
ML	56,0	33,7	73,0	46,2					
DL	63,0	37,3	80,0	66,4					

## 7 ANALÝZA A VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

V této kapitole budou porovnány jednotlivé varianty podle vlivu na jejich hladinu akustického výkonu. Dále zde budou provedeny důkladné analýzy vybraných vyústek včetně frekvenčních analýz v jednotlivých třetinooktávových pásmech, grafické zobrazení hladin akustických tlaků na celé kulové ploše s využitím programu Tecplot. V jedné z podkapitol je provedeno porovnávání hlučnosti se směřováním a tlakovou ztrátou jednotlivých variant vyústek.

### 7.1 POROVNÁNÍ JEDNOTLIVÝCH VARIANT, ROZBOR VÝSLEDKŮ

Tato podkapitola pojednává o porovnání jednotlivých konstrukčních variant vzduchovodu nebo pořadí a nastavení směřování lamel v benchmarkové vyústce. Barevná škála v tabulkách je zde z důvodu přehlednosti a vyznačení méně hlučných (zelené) a hlučnějších variant (červené). Legenda této škály, která platí pro všechny tabulky v této kapitole, je zpracována v tab. 12. Barevné škály jsou v každé tabulce zvlášť pro jednotlivé průtoky.






#### 7.1.1 VLIV POŘADÍ LAMEL NA $L_{WA}$

V tomto porovnání se zabýváme osmi variantami se stejnou jednoduchou motýlkovou klapkou a obloukem, z nichž čtyři mají přední lamely horizontální, zadní vertikální (xHxV) a další čtyři varianty mají pořadí naopak (xVxH). Pořadí lamel je z pohledu uživatele a x v označení znázorňuje proměnný počet lamel.

Tab. 11 Vliv pořadí lamel na  $L_{WA}$

Č. v.	Označení varianty	Průtok = 33,5 [m <sup>3</sup> /h]					Průtok = 80,6 [m <sup>3</sup> /h]				
		UR	MR	MM	ML	DL	UR	MR	MM	ML	DL
6	BM_5H5V_1BV_BD	38,4	36,6	35,7	37,3	43,9	60,1	59,1	55,9	61,3	62,0
7	BM_3H5V_1BV_BD	34,4	35,3	34,4	35,6	36,4	50,4	56,3	49,7	53,4	57,2
9	BM_5H3V_1BV_BD	35,3	34,0	34,4	33,8	38,5	52,0	55,8	55,9	53,1	53,3
10	BM_3H3V_1BV_BD	35,0	33,9	33,5	34,1	34,3	48,1	49,6	49,9	48,9	51,6
12	BM_5V5H_1BV_BD	34,9	34,7	36,2	34,6	40,1	48,9	48,7	49,7	48,6	56,6
13	BM_3V5H_1BV_BD	35,1	34,0	33,7	34,1	40,8	43,6	48,2	48,4	47,1	57,3
14	BM_5V3H_1BV_BD	35,5	33,9	33,7	33,8	37,6	49,7	46,2	48,8	47,7	53,5
15	BM_3V3H_1BV_BD	35,3	33,9	33,9	33,7	37,3	61,5	47,7	48,9	46,2	66,4

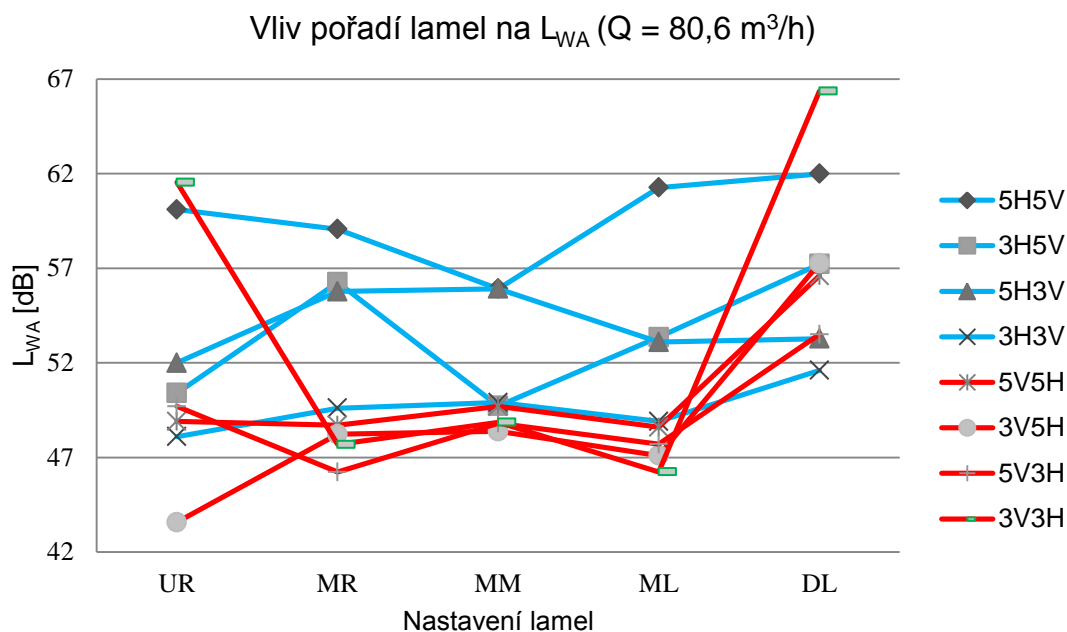
Tab. 12 Legenda k tabulkám

	Nejméně hlučná varianta
	
	Středně hlučná varianta
	
	Nejhlučnější varianta

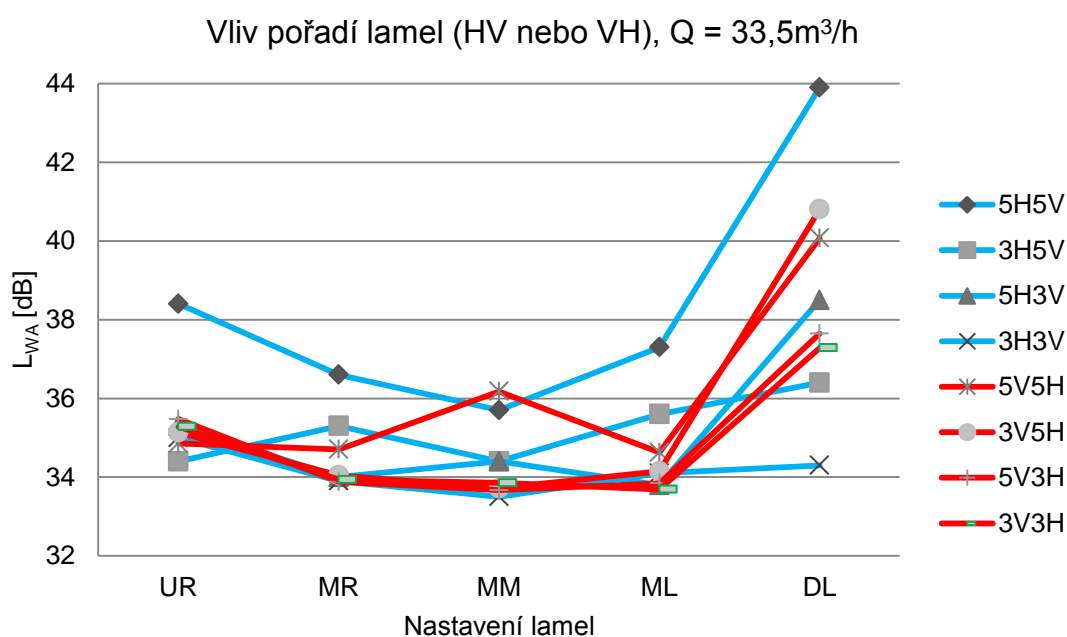
Z grafu na obr. 29 pro vyšší průtok 80,6 m<sup>3</sup>/h je zřejmé, že červeně označené varianty s předními vertikálními lamelami mají menší hodnoty akustického tlaku s váhovým filtrem A než modré, kde jsou horizontální lamely umístěny vepředu. Výjimkou je varianta 3V3H, která

vykazuje vysoké hodnoty v kritických nastaveních (UR, DL). Dále jsou u všech variant při nastavení lamel na DL průměrné výsledky podobné.

U průtoku  $33,5 \text{ m}^3/\text{h}$  nejsou zaznamenány, tak velké rozdíly jako u průtoku vyššího, pouze varianta 5H5V je podobně jako u průtoku  $80,6 \text{ m}^3/\text{h}$  nejvyšší. Varianty s předními vertikálními lamelami vycházejí méně hlučné. Tyto varianty budou detailněji popsány v následující podkapitole.



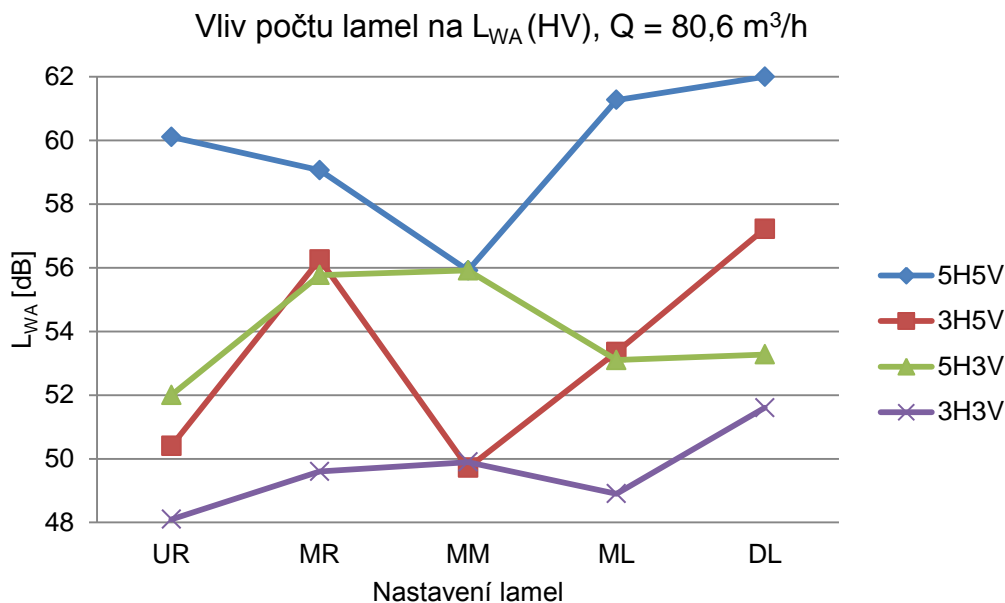
Obr. 29 Vliv pořadí lamel na  $L_{WA}$  ( $Q = 80,6 \text{ m}^3/\text{h}$ )



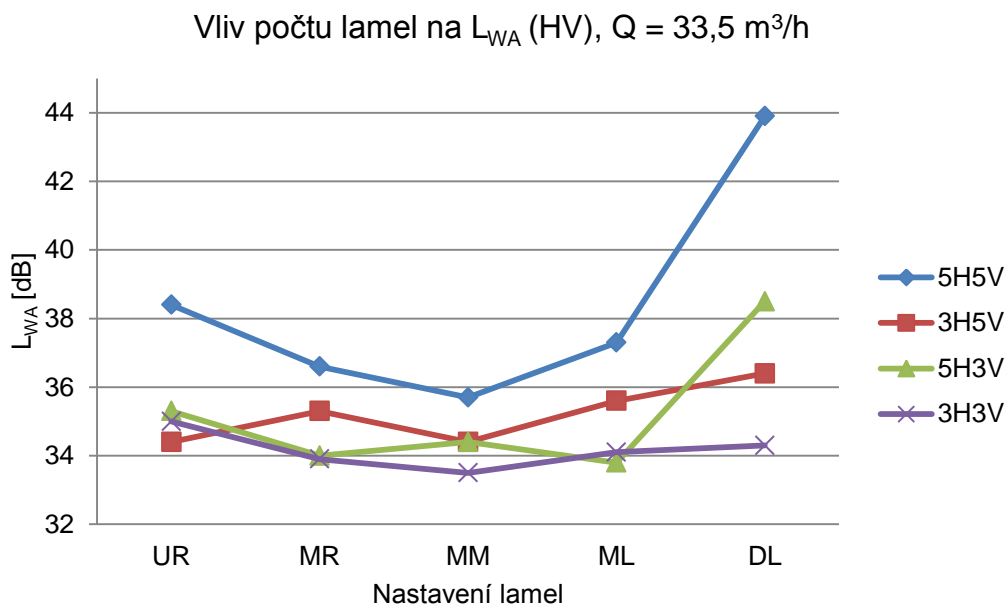
Obr. 30 Vliv pořadí lamel na  $L_{WA}$  ( $Q = 33,5 \text{ m}^3/\text{h}$ )

### 7.1.2 VLIV POČTU LAMEL NA $L_{WA}$

Vliv počtu lamel je hodnocen pro oba měřené průtoky. Hodnoty pro příslušné konstrukční varianty jsou stejné jako v tab. 10.



Obr. 31 Vliv počtu HV lamel na  $L_{WA}$  ( $Q = 80,6 \text{ m}^3/\text{h}$ )

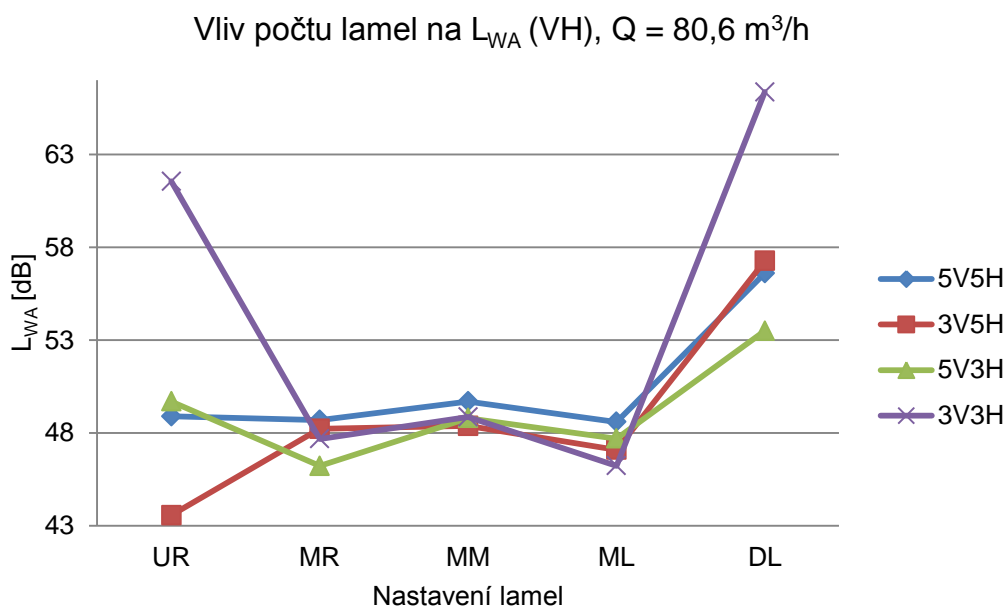


Obr. 32 Vliv počtu HV lamel na  $L_{WA}$  ( $Q = 33,5 \text{ m}^3/\text{h}$ )

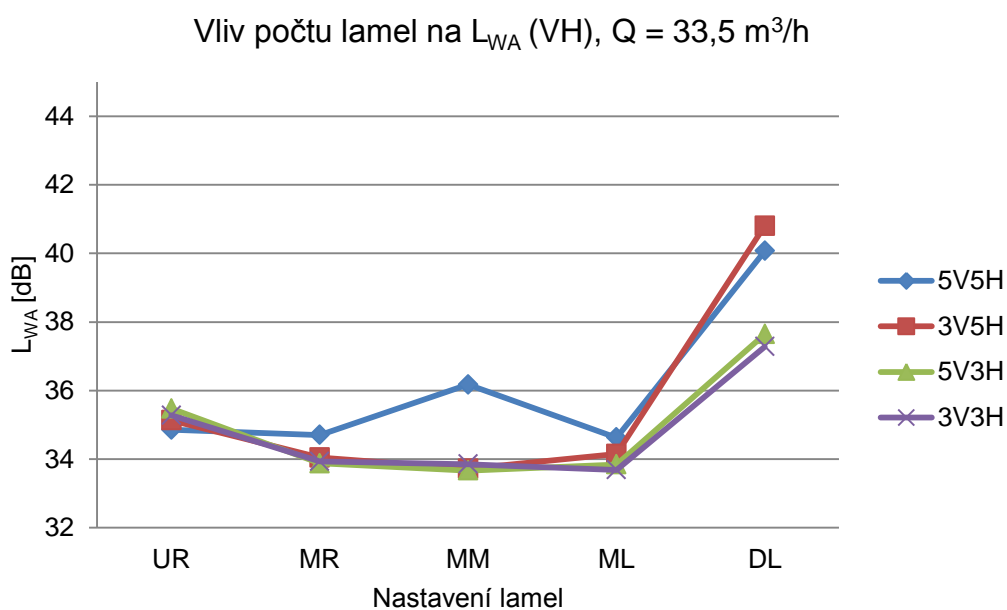
V grafu na obr. 31 je vidět, že s přibývajícím počtem lamel se zvyšuje hladina akustického výkonu korigovaná filtrem A. Mezi variantami 3H3V a 5H5V jsou rozdíly jednotlivých nastavení až 12 dB u varianty UR a při nastavení MM vychází rozdíl hladin 6 dB, což je též poměrně vysoká hodnota. Při stejném počtu předních lamel vycházejí

hodnoty u MM shodné i s rozdílným počtem zadních lamel. U směřování ostatních variant (UR, MR, ML, DL) záleží na celkovém součtu lamel (s rostoucím počtem lamel stoupá hlučnost).

V grafu s nižším průtokem, který je vykreslen na obr. 32, je varianta 5H5V jednoznačně nejhlučnější. Nejméně hlučná vyšla varianta 3H3V a zbylé dvě varianty jsou v rozmezí 1 dB, což je zanedbatelné.



Obr. 33 Vliv počtu VH lamel na  $L_{WA}$  ( $Q = 80,6 \text{ m}^3/\text{h}$ )



Obr. 34 Vliv počtu VH lamel na  $L_{WA}$  ( $Q = 33,5 \text{ m}^3/\text{h}$ )

Z testování předních vertikálních lamel vyšly hodnoty průměrně okolo 48 dB. Překvapivě nejvyšší vyšly hladiny akustického výkonu u varianty s nejmenším počtem lamel (3V3H) při kritických nastaveních UR ( $L_{WA} = 61,5$  dB) a DL ( $L_{WA} = 66,4$  dB).

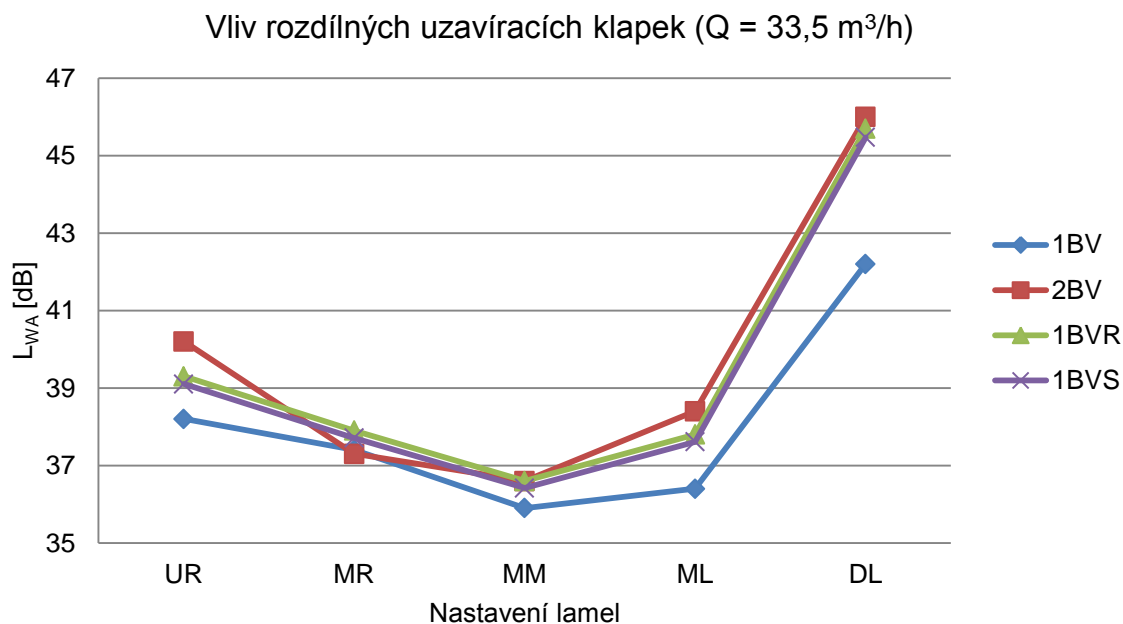
Při nižším průtoku vyšly naprosto totožně a nejlépe varianty 5V3H a 3V3H. Další dvě varianty mají vyšší hodnoty u nastavení lamel na DL a varianta 5V5H má o 2 dB vyšší hodnotu hladiny akustického výkonu při nastavení na MM.

### 7.1.3 VLIV ROZDÍLNÝCH UZAVÍRACÍCH KLAPEK NA $L_{WA}$

Rozdílné uzavírací klapky byly testovány na konstrukční variantě 5H5V s přímým vzduchovodem.

Tab. 13 Vliv rozdílných uzavíracích klapek na  $L_{WA}$

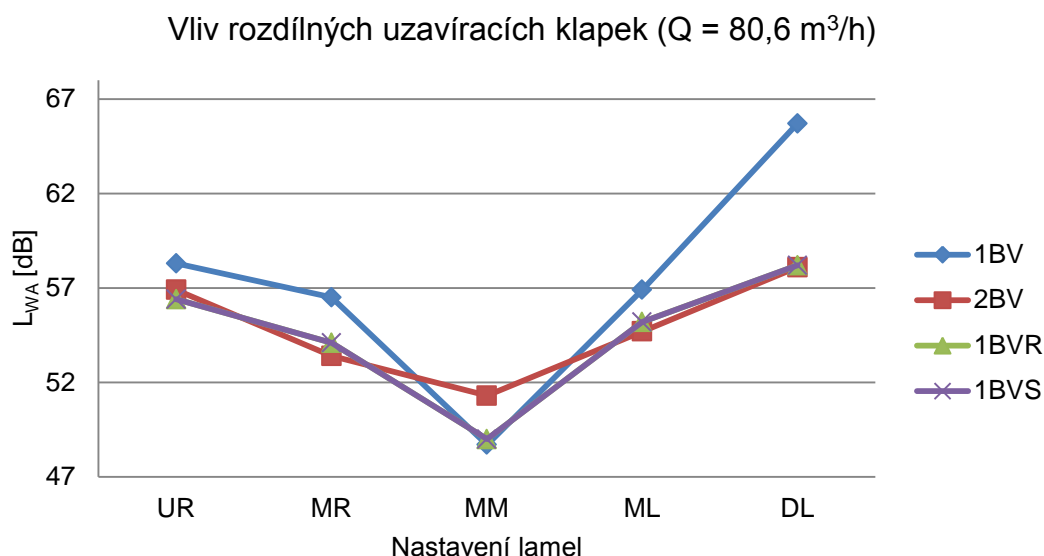
Č. v.	Označení varianty	Průtok = 33,5 [m <sup>3</sup> /h]					Průtok = 80,6 [m <sup>3</sup> /h]				
		UR	MR	MM	ML	DL	UR	MR	MM	ML	DL
1	BM_5H5V_1BV_STR	38,2	37,4	35,9	36,4	42,2	58,3	56,5	48,7	56,9	65,7
2	BM_5H5V_2BV_STR	40,2	37,3	36,6	38,4	46,0	56,9	53,4	51,3	54,7	58,1
3	BM_5H5V_1BVR_STR	39,3	37,9	36,6	37,8	45,7	56,4	54,1	49,0	55,2	58,2
4	BM_5H5V_1BVS_STR	39,1	37,7	36,4	37,6	45,5	56,4	54,1	49,0	55,2	58,2



Obr. 35 Vliv rozdílných uzavíracích klapek na  $L_{WA}$  ( $Q = 33,5$  m<sup>3</sup>/h)

Podle grafu na obr. 35 je vliv uzavíracích klapek na hlučnost při nízkém průtoku zanedbatelný. Pouze varianta s jednoduchou motýlkovou klapkou 1BV vychází cca o 1 až 2 dB nižší než ostatní varianty. Tato odchylka může být dána i nejistotou měření, která vychází  $\pm 2,9$  dB.





Obr. 36 Vliv rozdílných uzavíracích klapek na  $L_{WA}$  ( $Q = 80,6 \text{ m}^3/\text{h}$ )

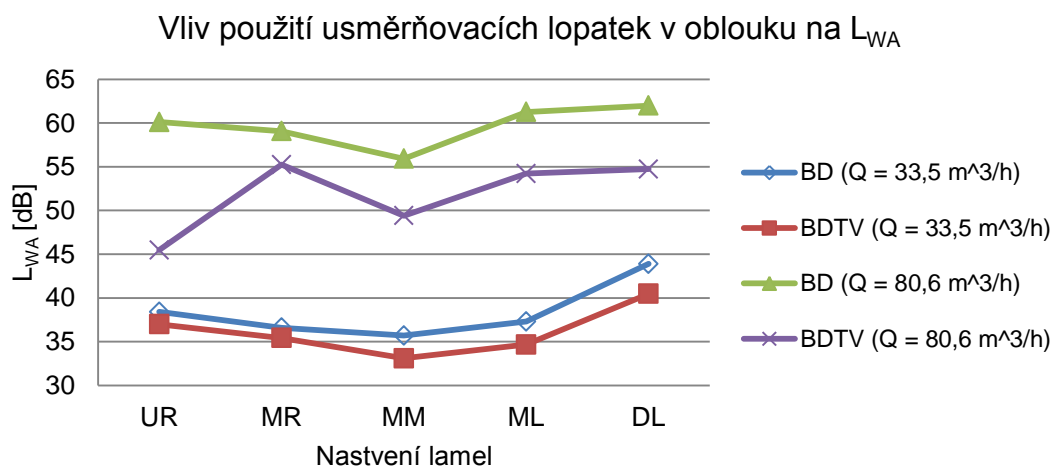
Uzavírací klapky vycházejí i s vyšším průtokem všechny čtyři téměř srovnatelně. Pouze konstrukční varianta s jednoduchou motýlkovou klapkou pro směrové nastavení lamel DL vychází rozdílně než u průtoku  $33,5 \text{ m}^3/\text{h}$ . V tomto případě vychází  $L_{WA} = 65,7 \text{ dB}$ .

#### 7.1.4 Vliv použití vodicích lopatek na $L_{WA}$

V této kapitole jsou rozebrány výsledky s použitím vodicích (usměrňovacích) lopatek v oblouku a bez nich.

Tab. 14 Vliv použití usměrňovacích lopatek na  $L_{WA}$

Č. v.	Označení varianty	Průtok = $33,5 \text{ m}^3/\text{h}$					Průtok = $80,6 \text{ m}^3/\text{h}$				
		UR	MR	MM	ML	DL	UR	MR	MM	ML	DL
6	BM_5H5V_1BV_BD	38,4	36,6	35,7	37,3	43,9	60,1	59,1	55,9	61,3	62,0
11	BM_5H5V_1BV_BDTV	37,0	35,4	33,1	34,7	40,5	45,5	55,2	49,4	54,2	54,7



Obr. 37 Vliv použití usměrňovacích lopatek v oblouku na  $L_{WA}$

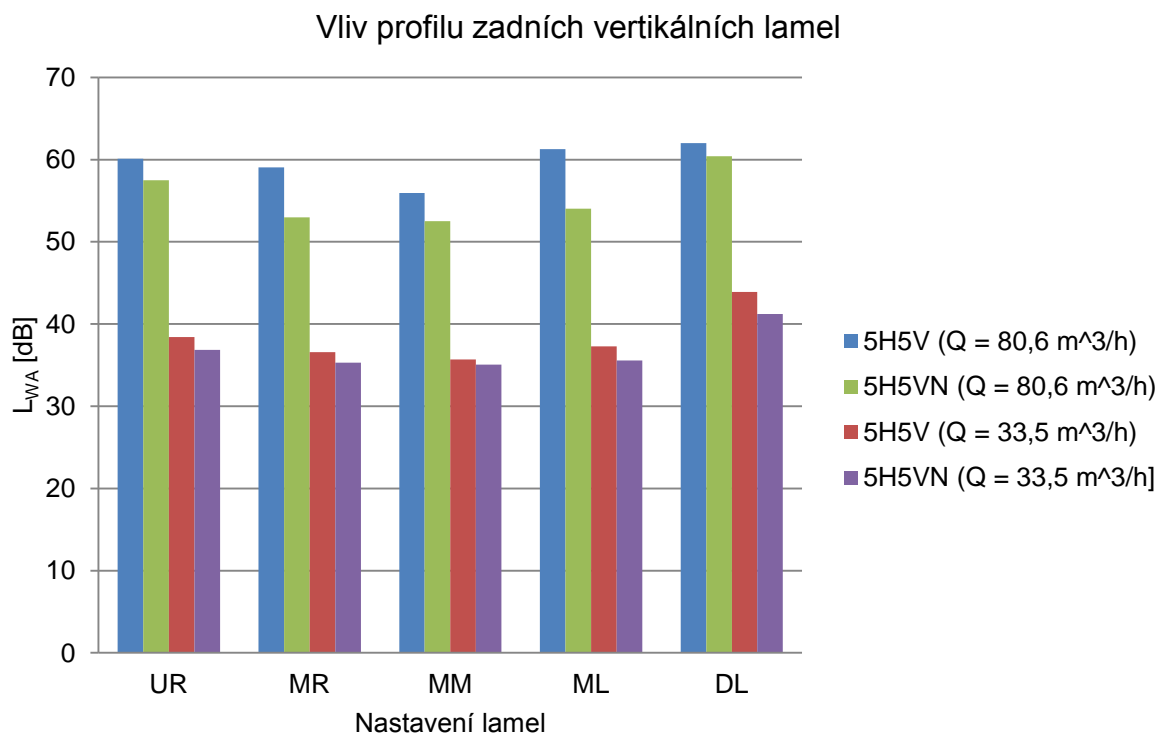
Podle teorie z literatury snižují usměrňovací lopatky tlakové ztráty v kolenech a obloucích, s čímž je spojena i hlučnost výustek. Tento fakt potvrzují i naměřené hodnoty zobrazené grafem na obr. 37, kde je při nižším průtoku pozorováno snížení hlučnosti s použitím usměrňujících lopatek o 1 dB až 3 dB. Při vyšším průtoku  $Q_V = 80,6 \text{ m}^3/\text{h}$  činí snížení hladiny akustického výkonu s váhovým filtrem A přibližně o 4 dB až 8 dB. Pouze u nastavení s označením UR vychází hodnota s použitím usměrňujících lopatek o 14,6 dB nižší než bez jejich použití. Toto nastavení se používá pro odmlžování pravého okna.

### 7.1.5 VLIV TVARŮ LAMEL NA $L_{WA}$

Sledované varianty pro toto porovnání se liší pouze tvarem zadních vertikálních lamel. Přední lamely mají aerodynamický tvar ve všech variantách. Konstruktivní varianta označená 5H5VN má aerodynamický tvar jednotlivých lamel, což zlepšuje jejich obtékání a snižuje tvorbu vírů v úplavech zpravidla spojenou s hlukem.

Tab. 15 Vliv tvarů lamel na  $L_{WA}$

Č. v.	Označení varianty	Průtok = 33,5 [m <sup>3</sup> /h]					Průtok = 80,6 [m <sup>3</sup> /h]				
		UR	MR	MM	ML	DL	UR	MR	MM	ML	DL
6	BM_5H5V_1BV_BD	38,4	36,6	35,7	37,3	43,9	60,1	59,1	55,9	61,3	62,0
8	BM_5H5VN_1BV_BD	36,9	35,3	35,1	35,6	41,2	57,5	53,0	52,5	54,0	60,4



Obr. 38 Vliv tvaru zadních vertikálních lopatek na  $L_{WA}$

Měření při obou průtocích dokazuje snížení hladin akustického výkonu s použitím aerodynamických tvarů lamel. Při nižším průtoku je zaznamenáno snížení o 0,7 dB až 2,7 dB a při vyšším průtoku se jedná o snížení cca 2 dB až 6 dB.

### 7.1.6 ROZDÍL MEZI POTRUBÍM S OBLOUKEM A BEZ

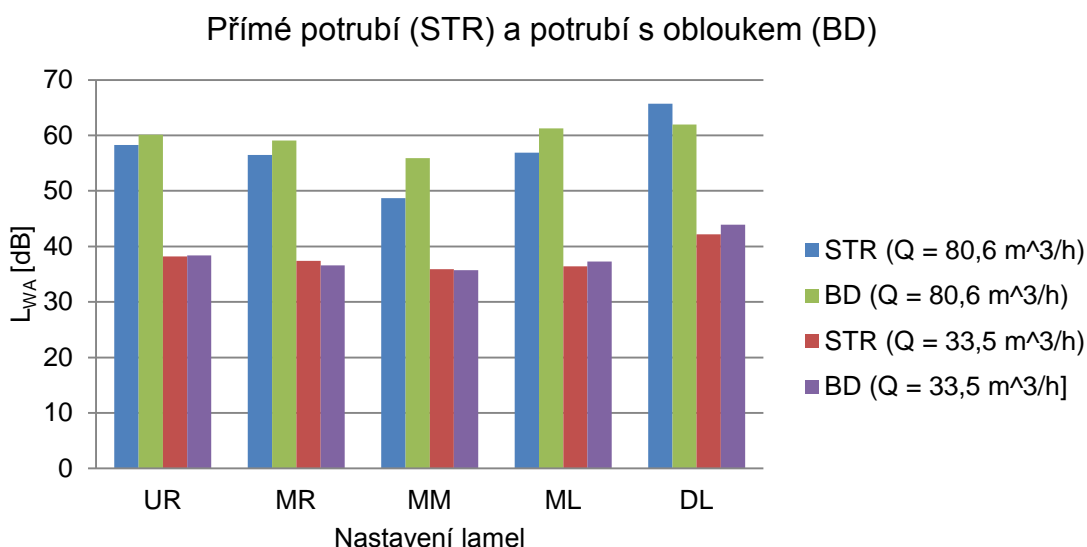
Tato podkapitola se věnuje porovnání hlučnosti varianty s přímým vzduchotechnickým potrubím a varianty s vloženým obloukem.

Tab. 16 Přímý vzduchovod a vzduchovod s obloukem

Č. v.	Označení varianty	Průtok = 33,5 [m <sup>3</sup> /h]					Průtok = 80,6 [m <sup>3</sup> /h]				
		UR	MR	MM	ML	DL	UR	MR	MM	ML	DL
2	BM_5H5V_1BV_STR	38,2	37,4	35,9	36,4	42,2	58,3	56,5	48,7	56,9	65,7
6	BM_5H5V_1BV_BD	38,4	36,6	35,7	37,3	43,9	60,1	59,1	55,9	61,3	62,0

Podle naměřených hodnot vychází, že při nižším průtoku nemá vložení oblouku významný vliv na celkový akustický výkon s filtrem A. U průtoku 80,6 m<sup>3</sup>/h byly zaznamenány hladiny akustického výkonu s obloukem vyšší o 1,8 dB až 7,2 dB s výjimkou kritického nastavení DL, kde vyšla varianta s přímým vzduchovodem mírně hlučnější.

V automobilech jsou kolena a oblouky nedílnou součástí celého systému. Vzduchovody spojují ventilátor s jednotlivými vyústkami a obcházejí různé tvary objektů, což umožňují právě kolena a oblouky. Experiment potvrzuje, že s rostoucím počtem kolen se zvyšuje tlaková ztráta, která způsobuje rostoucí hladinu akustického výkonu.



Obr. 39 Přímé potrubí a potrubí s obloukem

## 7.2 POROVNÁNÍ VARIANT Z HLEDISKA SMĚROVÁNÍ A HLUKU

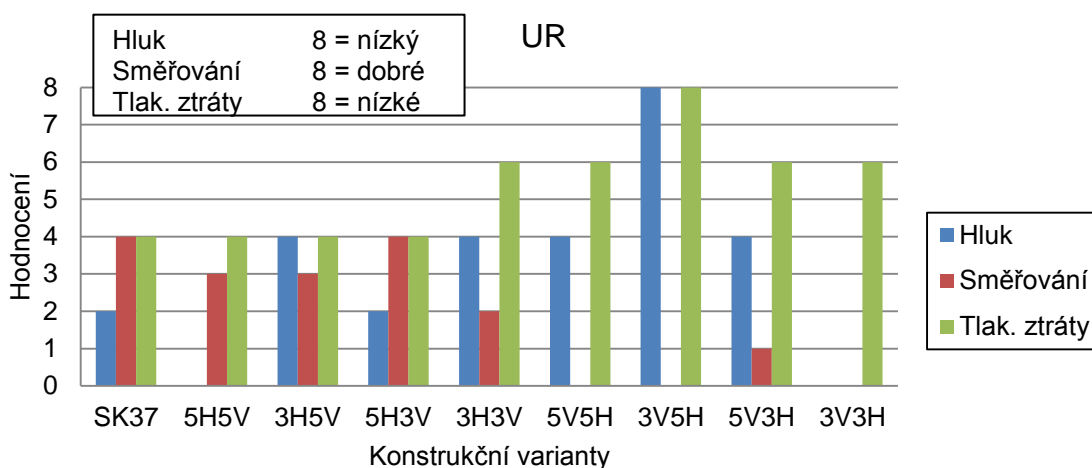
Tato kapitola se zaměřuje na porovnávání hlučnosti jednotlivých konstrukčních variant s jejich směřováním v horizontální i vertikální rovině. Porovnáváno je osm základních variant s vloženým kolenem označených BM\_XXXX\_1BV\_BD (X označují různé konstrukční varianty vyústky). Navíc je varianta originální vyústky z automobilu ŠKODA Octavia III s názvem SK37.

Pro porovnávání třech parametrů byla vytvořena stupnice od 0 do 8, na kterou byly přepočítány výsledky. Každý z těchto parametrů je nejlépe hodnocen stupněm 8 (nízký hluk, dobré směřování, nízké tlakové ztráty). Do hodnocení směřování jsou zahrnuty oba směry pozorování.

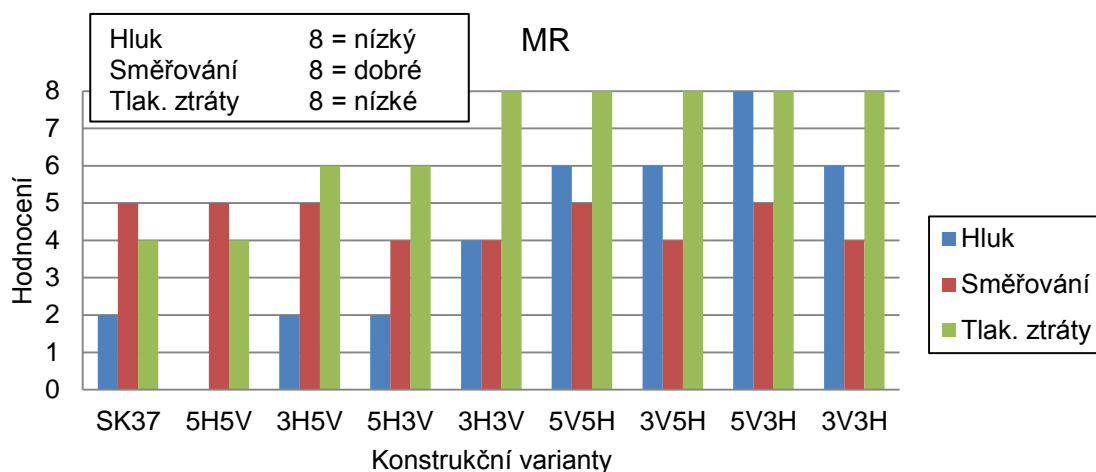
Na obr. 40 je hodnocení pro nastavení lamel na UR je z hlediska hluku jednoznačně nejlepší varianta 3V5H. Tlaková ztráta je zde malá, avšak směřování je zde velmi špatné. Při komplexním hodnocení je nejlepší varianta 3H5V, ale je také pouze průměrná. Varianta 3V3H je celkově nejhorší. [33]

U nastavení lamel na MR se oproti nastavení UR zlepšilo směřování s předními vertikálními lamelami. V grafu na obr. 41 jsou zejména varianty 5V3H a 5V5H poměrně dobře hodnocené. Nejhuře naopak vyšla varianta 5H3V, kde jsou směřování i hluk špatné. [33]

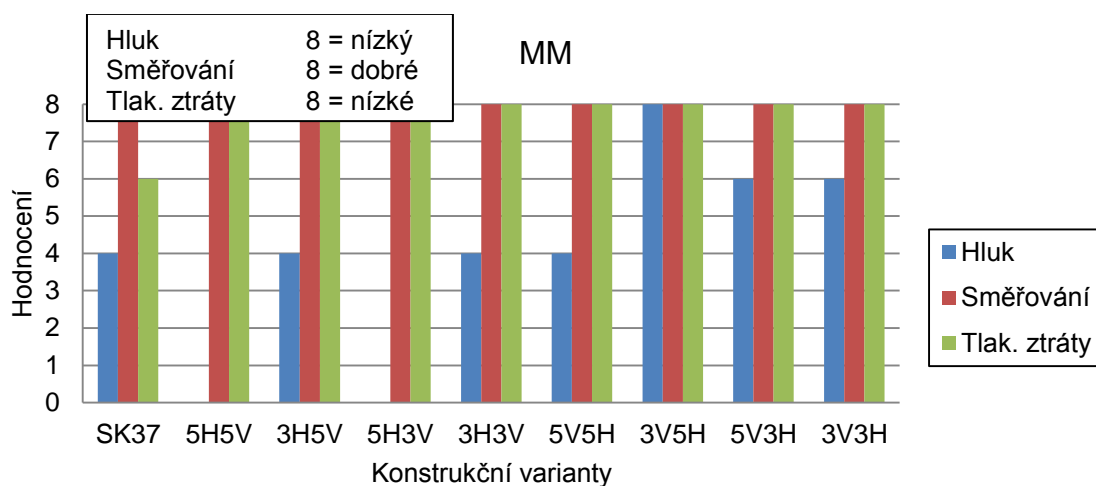
Na obr. 42 je hodnocení pro nastavení MM je směřování u všech variant výborné a z hlediska hlučnosti vycházejí nejlépe varianty s předními vertikálními lamelami. Velmi špatně zde vyšly pouze varianty s pěti předními lamelami. [33]



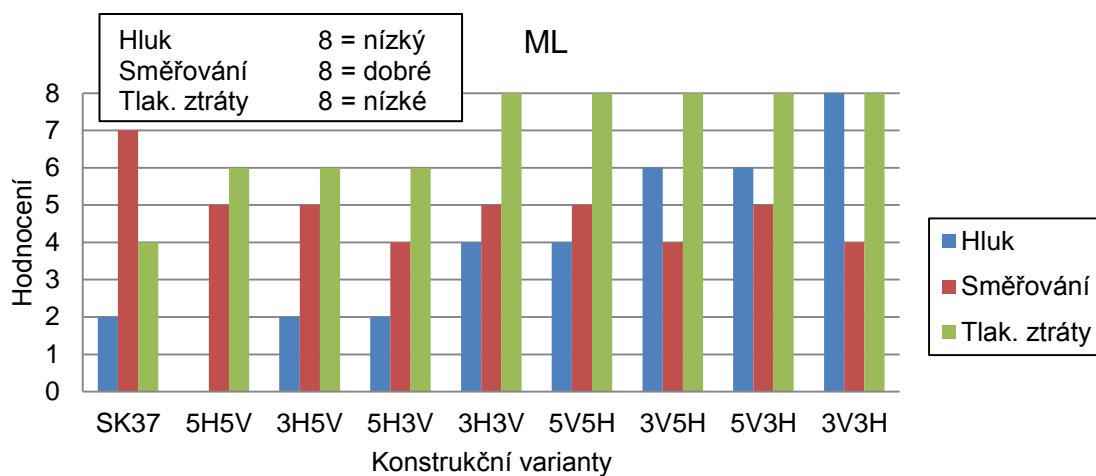
Obr. 40 Hodnocení hluku, směřování a tlakových ztrát při nastavení UR, [33]



Obr. 41 Hodnocení hluku, směrování a tlakových ztrát při nastavení MR, [33]

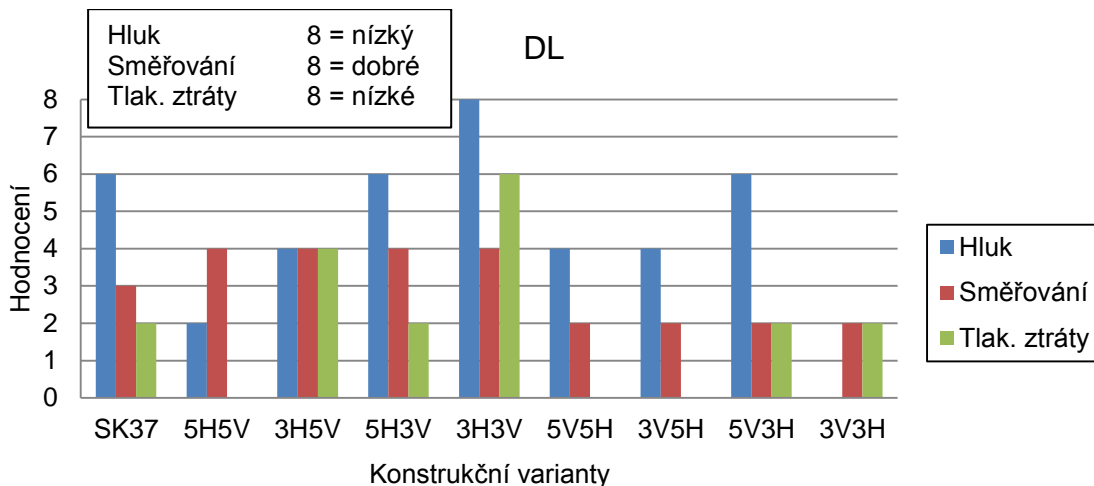


Obr. 42 Hodnocení hluku, směrování a tlakových ztrát při nastavení MM, [33]



Obr. 43 Hodnocení hluku, směrování a tlakových ztrát při nastavení ML, [33]

Nastavení směrovacích lamel na ML vyšlo téměř stejně jako nastavení MR. Směrování průměrné až dobré a hlučnost velmi dobrá byla naměřena u variant s předními vertikálními lamelami a naopak u variant s předními horizontálními lamelami vyšla špatně, což popisuje graf na obr. 43. [33]



Obr. 44 Hodnocení hluku, směrování a tlakových ztrát při nastavení DL, [33]

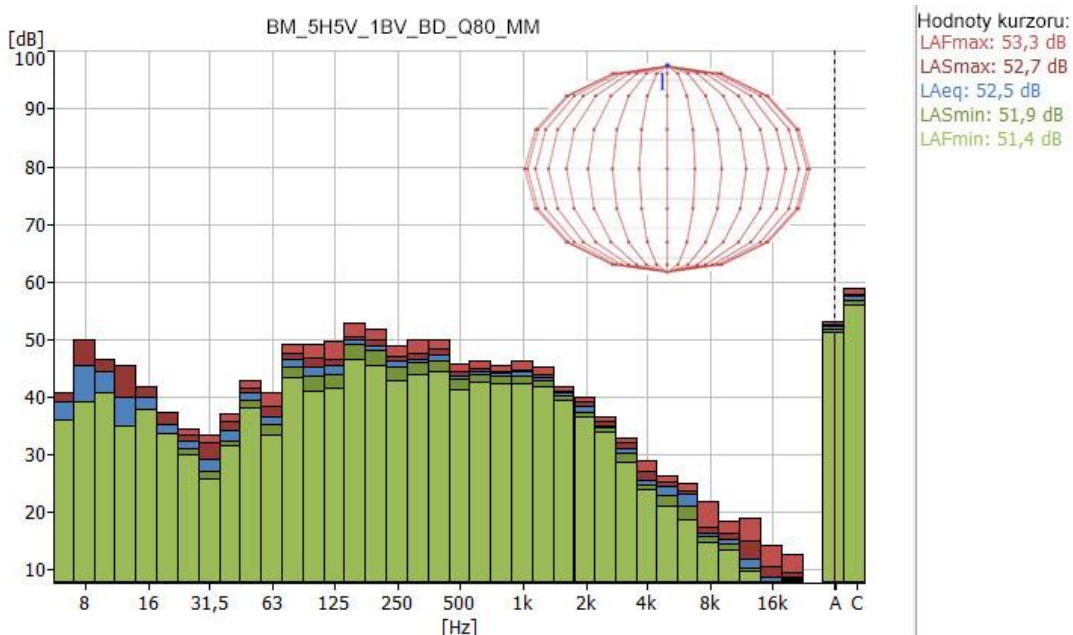
Hodnocení pro kritické nastavení DL je vykresleno v grafu na obr. 44 a vykazuje komplexně špatné hodnocení parametrů kromě variant 5H3V a 3H3V, které lehce vystupují z průměru. Z hlediska hlučnosti je zde výborná varianta 3H3V a dobré jsou varianty SK37, 5H3V a 5V3H. Lepší (průměrné) směrování je u předních horizontálních lamel. [33]

### 7.3 FREKVENČNÍ ANALÝZA

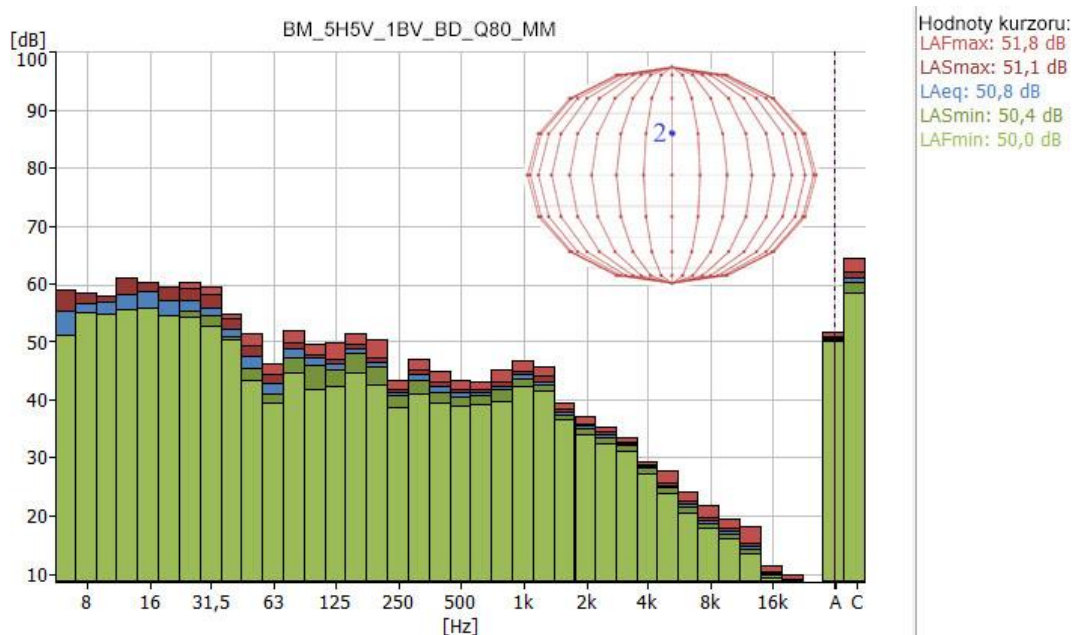
V této podkapitole je provedena třetinooktávová (frekvenční) analýza vybraných konstrukčních variant benchmarkové výústky.

#### 7.3.1 VARIANTA BM\_5H5V\_1BV\_BD\_Q80

Varianta 5H5V byla zvolena z důvodu nejvyšší naměřené hlučnosti a možnosti stanovení její příčiny. Na obr. 47 je spektrální analýza maximální hodnoty zmiňované varianty při nastavení lamel na MM, vytvořená v programu BZ5503 od firmy Brüel & Kjær. Veličiny popisující jednotlivé grafy jsou charakterizovány v seznamu použitých veličin. Označení číslicí na kulové ploše vysvětluje pořadí měření a umístění jednotlivých bodů. Sloupce v grafech na pravé straně (A, C) popisují hodnoty akustických výkonů s příslušnými filtry.



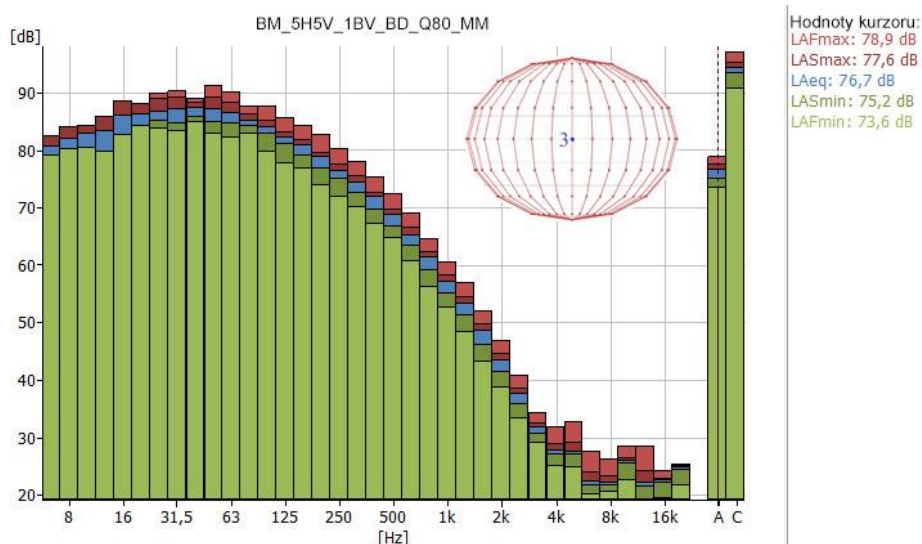
Obr. 45 Třetinooktávová frekvenční charakteristika varianty 5H5V\_MM, bod 1



Obr. 46 Třetinooktávová frekvenční charakteristika varianty 5H5V\_MM, bod 2

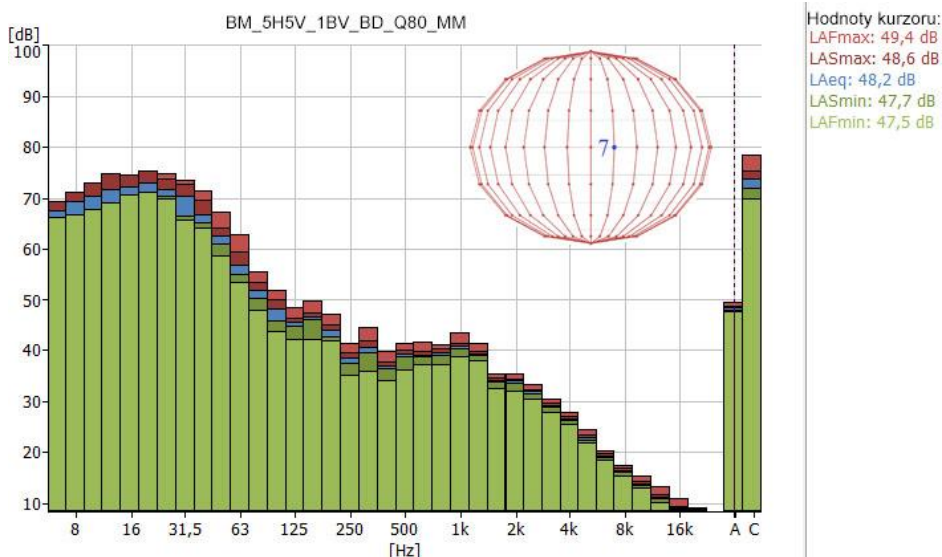
Rozdíly mezi zkoumanými body 1 a 2 je možné nalézt pouze v nízkých frekvencích do 63 dB. V bodě 2 jsou hladiny akustického tlaku přibližně o 15 až 20 dB vyšší.

V bodě 3 je centrum směřování proudu vzduchu daného nastavení vyústky, z čehož je zřejmé, že zde jsou i maximální hodnoty akustického tlaku.



Obr. 47 Třetinooktávová frekvenční charakteristika maxima varianty 5H5V\_MM, bod 3

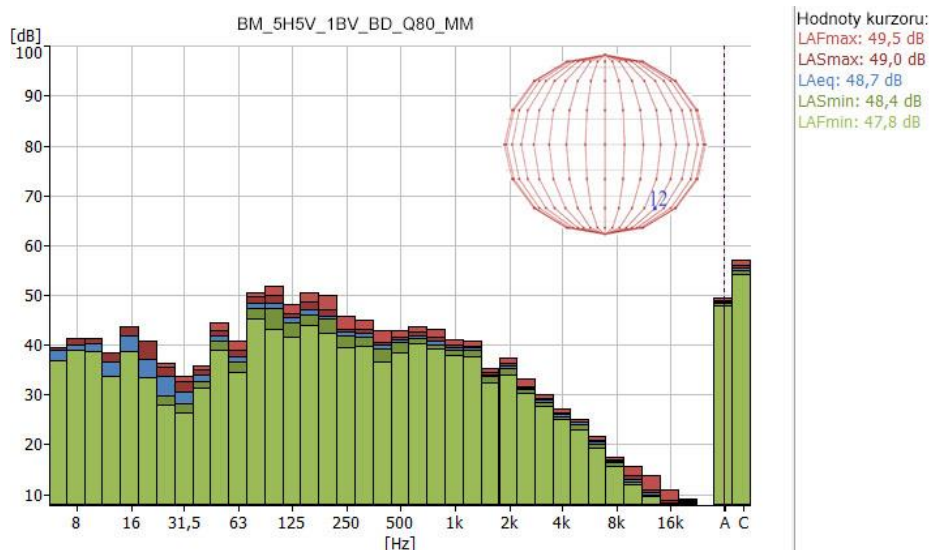
Bod 7 na obr. 48 se nachází na okraji proudu vzduchu s menšími rychlostmi. Spektrum je podobné jako u bodů jedna a dva s rozdílem, že v bodě 7 je vyšší nízkofrekvenční hluk o 15 dB než v bodě 2.



Obr. 48 Třetinooktávová frekvenční charakteristika varianty 5H5V\_MM, bod 7

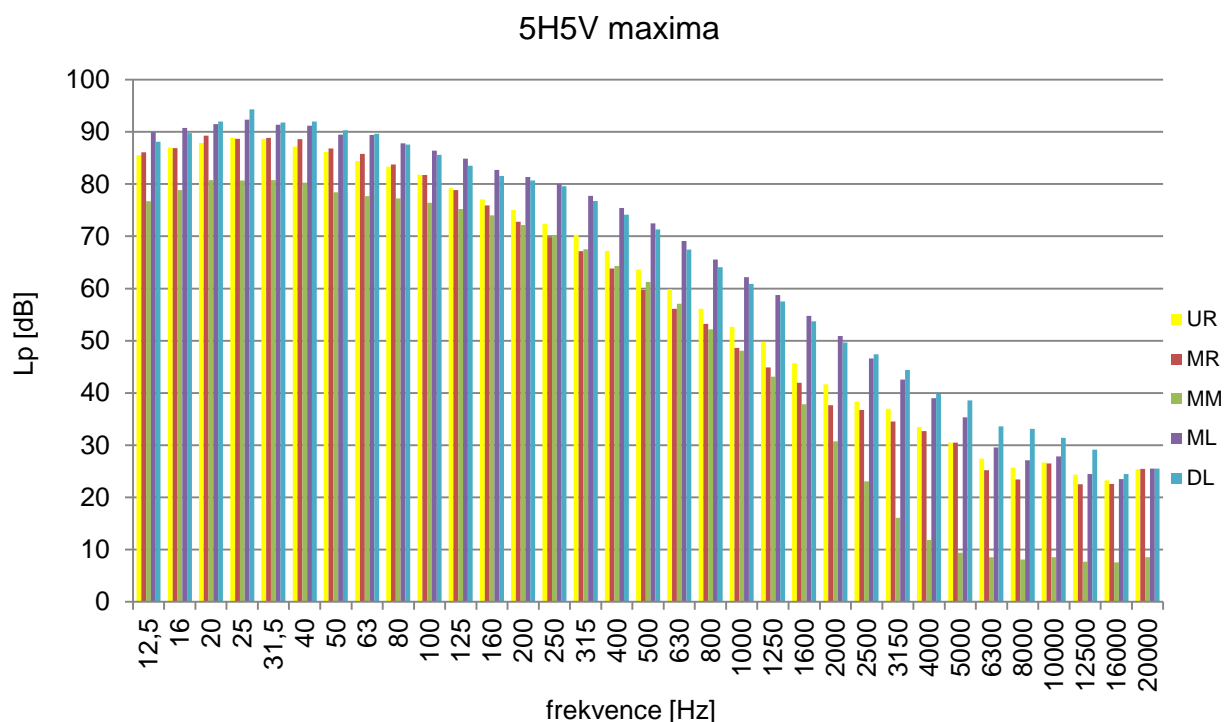
Spektrální charakteristika bodu 12 na obr. 49 je analogická k bodu 1, což ukazuje na podobné vlastnosti mimo proud vzduchu. Tato analogie dokazuje možnost dopočítávání ostatních bodů za účelem zjednodušení experimentu bez negativního vlivu na samotnou práci s přínosem v podobě ušetření času.





Obr. 49 Třetinooktávová frekvenční charakteristika varianty 5H5V\_MM, bod 12

Spektrální charakteristiky maximálních hodnot všech nastavení lamel pro variantu 5H5V jsou zobrazeny na obr. 50 a ukazují na podobné vlastnosti všech nastavení. Výjimkou je nastavení MM (zelená), kde je zaznamenán významný pokles hladin akustického tlaku ve vysokých frekvencích. Jedná se o kmitočty od 2,5 kHz výše a pokles zde činí až cca 20 dB.

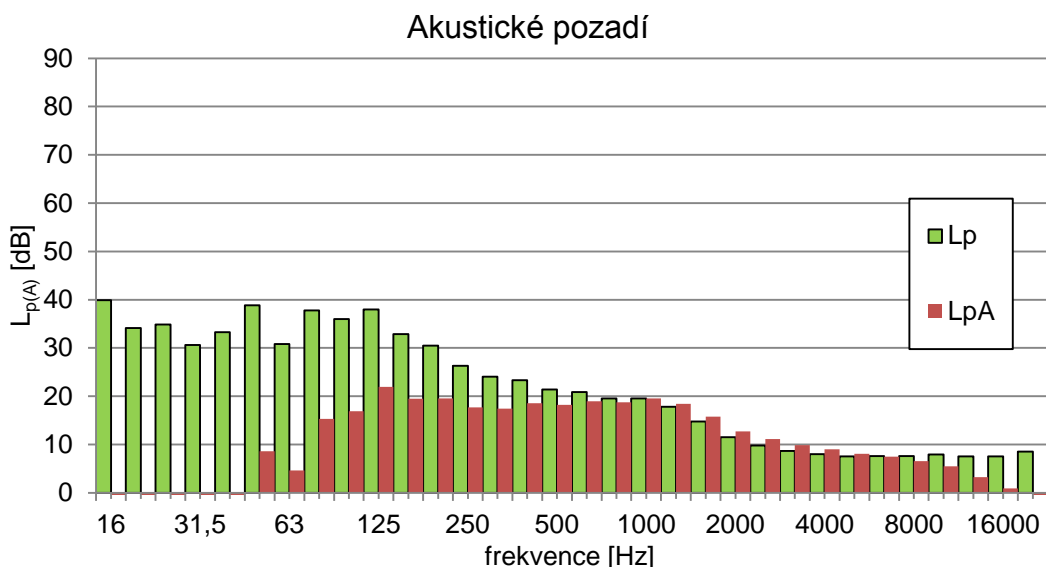


Obr. 50 Frekvenční charakteristika varianty 5H5V, maxima jednotlivých nastavení lamel

### 7.3.2 FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA AKUSTICKÉHO POZADÍ

Hluk akustického pozadí zahrnuje hluk šířený vzduchem, konstrukcemi (vibrace) a elektrický šum v přístrojích. Hlukem pozadí se rozumí každý zdroj hluku s výjimkou měřeného zdroje hluku.

Akustické pozadí by z pravidla mělo být v laboratorních podmínkách téměř stejné pro všechna měření. Z důvodu snahy o korektní výsledky bylo pozadí vždy kontrolováno před každým provedeným měřením.



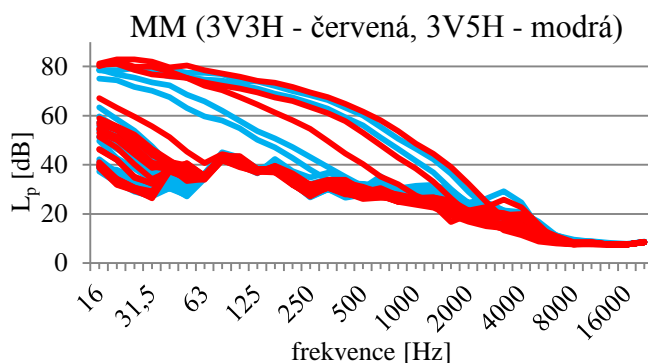
Obr. 51 Třetinooktávová frekvenční charakteristika akustického pozadí

### 7.3.3 VARIANTA 3V3H

Z grafu na obr. 33 je patrné, že u varianty 3V3H jsou naměřeny zvýšené hodnoty akustických tlaků u kritických nastavení lamel (UR, DL). Z toho důvodu je tato varianta rozebírána spektrální analýzou. V grafech na obr. 52, 53 a 54 jsou porovnány frekvenční charakteristiky varianty 3V3H s variantou 3V5H, které by teoreticky měly vykazovat podobné vlastnosti. Ve zmiňovaných grafech jsou zakresleny všechny měřené body obou variant. Nemí důležité, kde přesně se body nacházejí, podstatný je rozdíl mezi variantami.

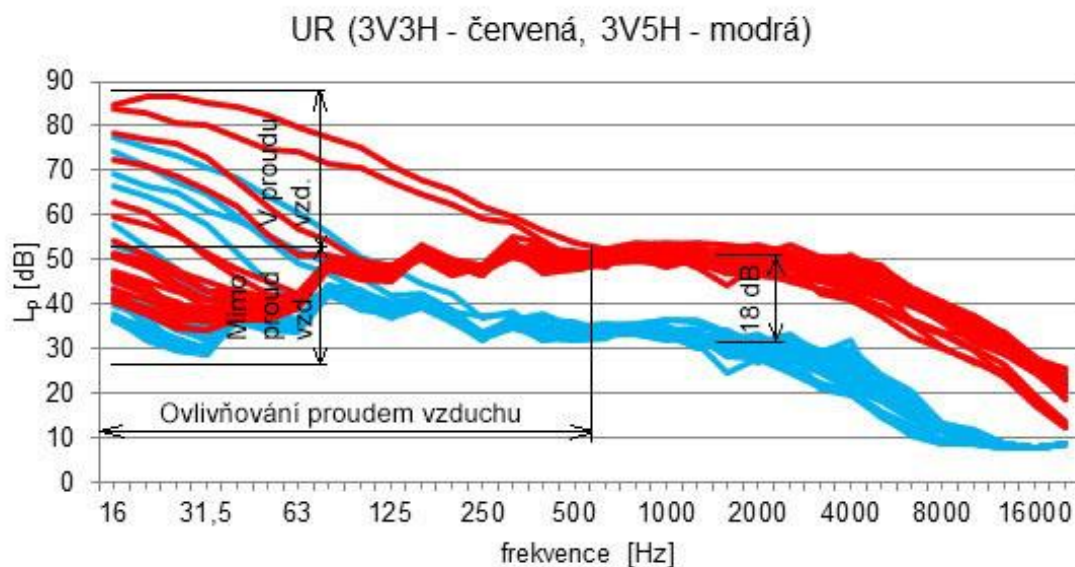
Tab. 17 3V3H a 3V5H

Sm.	BM_3V3H_1BV_BD		
	$L_W$	$L_{WA}$	$\Delta p_{ztr}$
	[dB]	[dBA]	[Pa]
UR	74,3	61,5	12,3
MM	72,0	48,9	5,0
DL	80,0	66,4	32,9
	BM_3V5H_1BV_BD		
	$L_W$	$L_{WA}$	$\Delta p_{ztr}$
	[dB]	[dBA]	[Pa]
UR	63,4	43,6	9,2
MM	70,1	48,4	6,1
DL	75,4	57,3	43,8



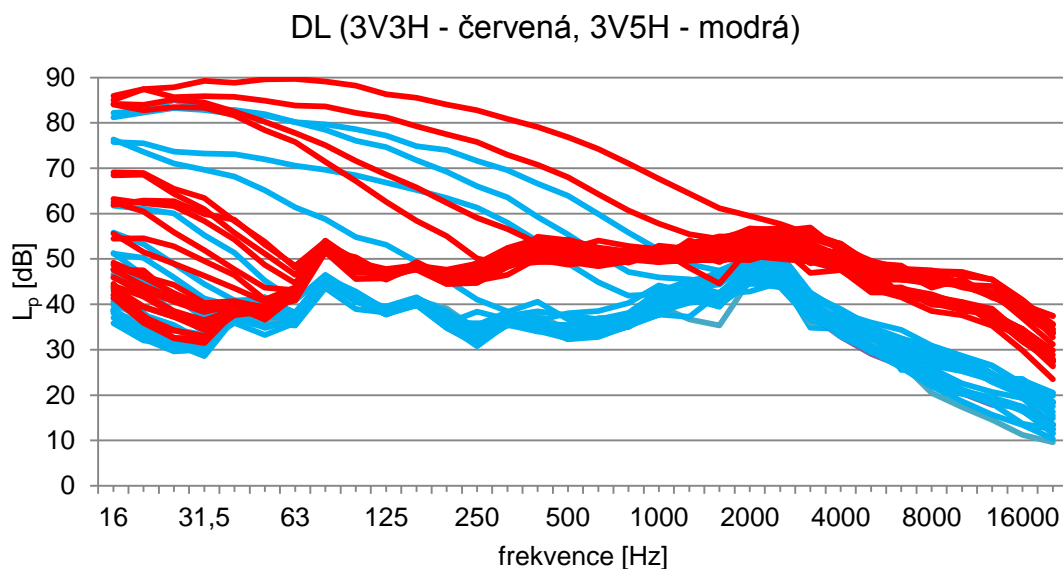
Obr. 52 Frekvenční charakteristika, nastavení lamel MM

Obě varianty disponují při nastavení lamel na MM shodnou tlakovou ztrátou i hladinou akustického tlaku, což dokazuje překrývání frekvenčních charakteristik jednotlivých bodů v grafu na obr. 52.



Obr. 53 Frekvenční charakteristika variant 3V3H a 3V5H, nastavení lamel UR

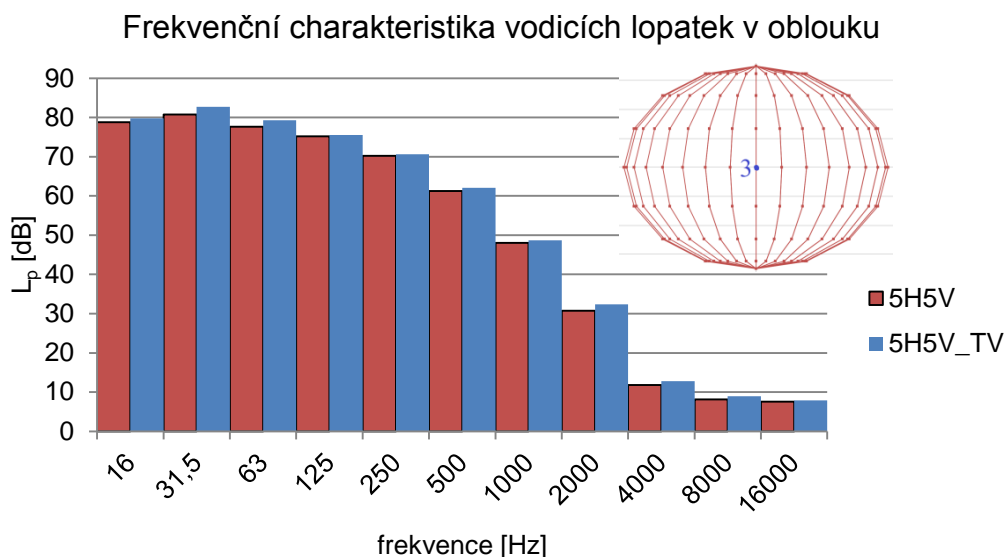
U nastavení UR na obr. 53 jsou červené charakteristiky (3V3H) posunuty v téměř celém frekvenčním pásmu o cca 18 dB a u nastavení DL o cca 9 dB. Rozdílné charakteristiky v nižších frekvencích signalizují různé rychlosti a turbulence proudu vzduchu.



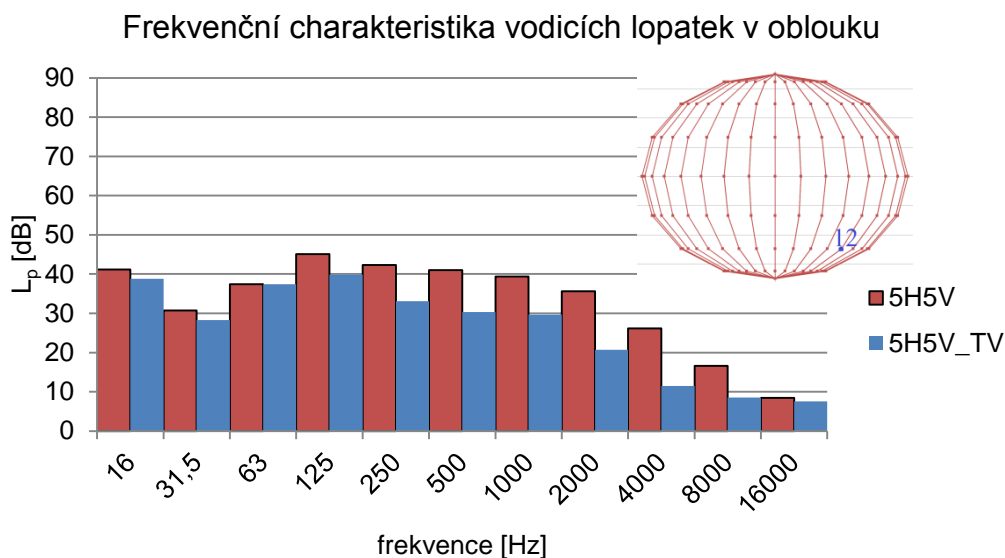
Obr. 54 Frekvenční charakteristika variant 3V3H a 3V5H, nastavení lamel DL

### 7.3.4 FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA VODICÍCH LOPATEK

Frekvenční charakteristika vodicích lopatek základní varianty 5H5V při nastavení MM na obr. 55 a obr. 56 ukazuje, že charakteristiky měřených bodů v proudu vzduchu vycházejí přibližně stejně, zatímco body mimo proud vzduchu s lopatkami a bez lopatek mají rozdílné charakteristiky. Ve slyšitelném frekvenčním pásmu jsou rozdíly až 10 dB.



Obr. 55 Frekvenční charakteristika vodicích lopatek v oblouku a bez nich, bod 3



Obr. 56 Frekvenční charakteristika vodicích lopatek v oblouku a bez nich, bod 12

Tyto charakteristiky nepotvrzují závěry uvedené v [1], kde je popsáno použití vodicích lopatek spojené se snižováním tlakové ztráty, ale také se zvyšováním hluchnosti v oblasti středních frekvencí. Tento jev může být zapříčiněn např. použitím rozdílných vodicích lopatek nebo jejich rozdílnou roztečí.

## 7.4 GRAFICKÁ VIZUALIZACE VÝSLEDKŮ

V této části práce jsou zobrazeny naměřené výsledky v prostoru na kulové ploše ve vzdálenosti 35 cm od středu vyústky. Pro grafické zobrazení je použit program Tecplot. V tomto programu byla vytvořena kulová plocha, na kterou byla interpolována naměřená data. Výstupem jsou mapy hluku popisující velikosti hladin akustického tlaku v okolí vyústky.

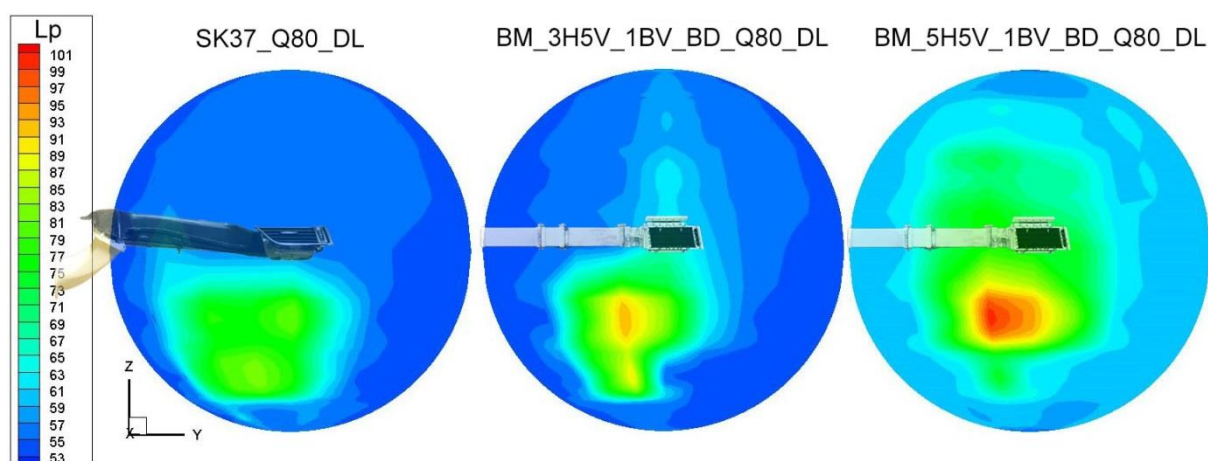
### 7.4.1 TECPLOT

Tecplot je software umožňující inženýrům a vědcům pracujícím s výpočetní dynamikou kapalin (CFD) vizualizovat, analyzovat a následně porozumět informacím z komplexních dat. V programu jdou vytvořit efektivní obrázky a animace pro následné prezentace svých prací. [34]

### 7.4.2 POROVNÁNÍ VYBRANÝCH VARIANT

Pro grafické porovnání byly vybrány varianty SK37, 3H5V a 5H5V. První zmiňovaná varianta je používána v reálných automobilech a další dvě jsou benchmarkové vyústky vytvořené pro laboratorní experimenty. Varianta se třemi horizontálními lamelami byla vybrána, protože vychází jedna z nejlepších v kombinaci směřování a hlučnosti. Varianta 5H5V vychází jednoznačně nejhlučnější a z toho důvodu byla zařazena do následujícího porovnávání. Jedná se o zobrazení hladin akustického tlaku bez váhového filtru A.

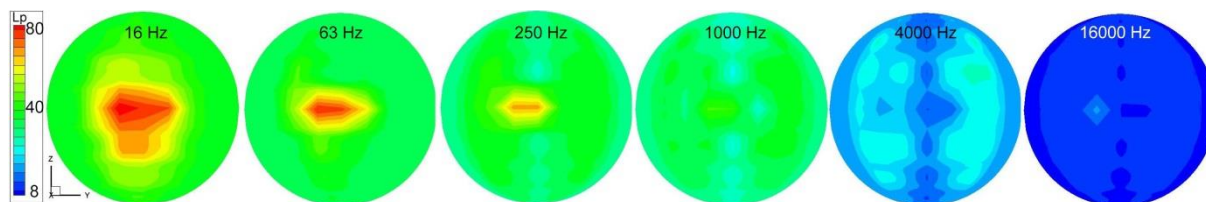
Varianta SK37 vykazuje dobré parametry směřování a nejsou u ní pozorovány žádné extrémní hodnoty hladin akustického tlaku. Varianta 3H5V má podobné vlastnosti hlučnosti jako vyústka SK37. U varianty 5H5V lze pozorovat extrém ve středu proudu vzduchu a zároveň zvýšené hodnoty hladin akustického tlaku mimo proud, což potvrzuje vysokou hlučnost dané vyústky. Hladiny akustického tlaku této varianty jsou cca o 10 dB vyšší než u SK37 a o cca 5 dB vyšší než u 3H5V.



Obr. 57 Grafické zobrazení (porovnání variant)

### 7.4.3 VIZUALIZACE FREKVENČNÍ ANALÝZY

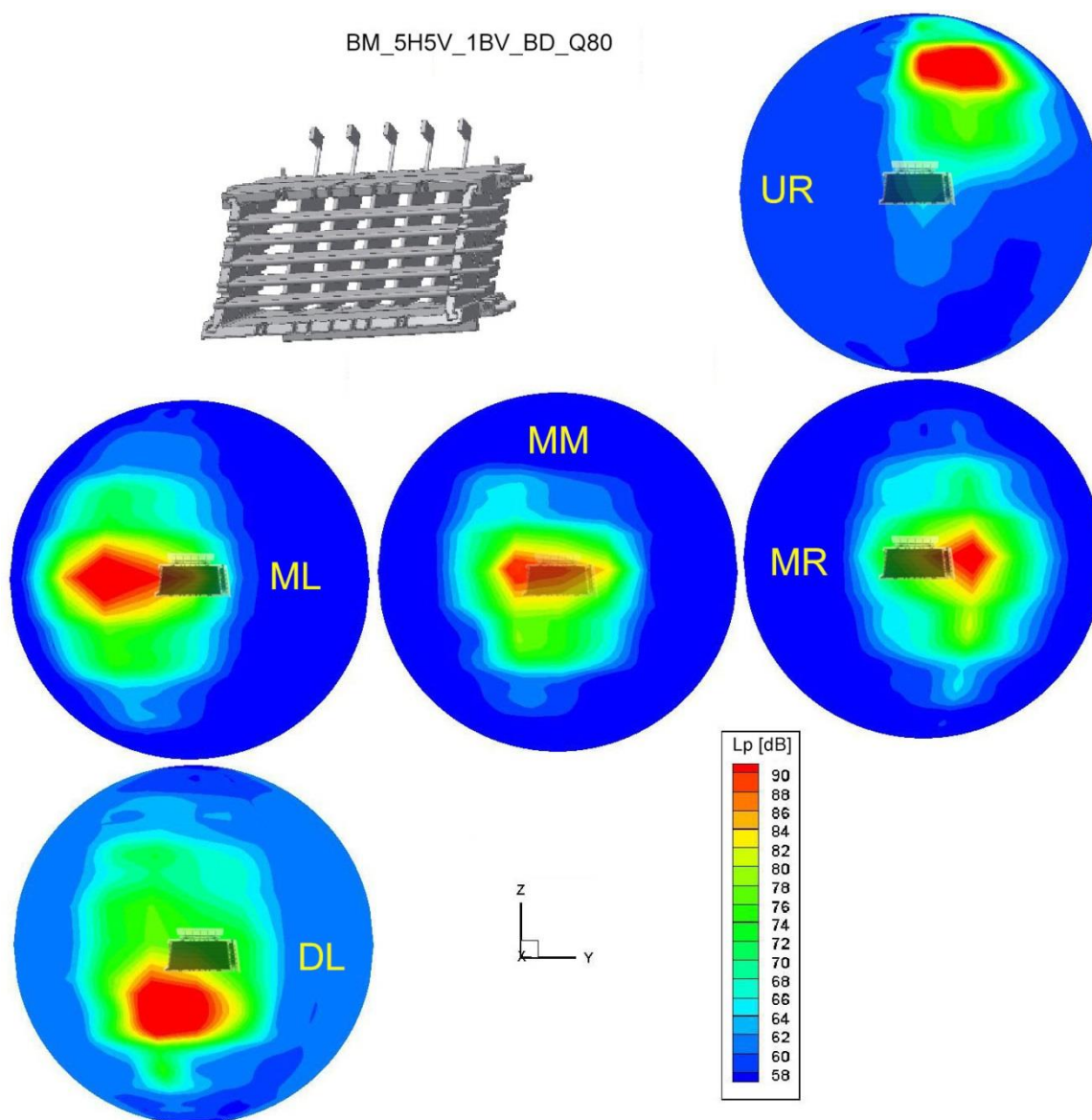
Na obr. 58 je zobrazení  $L_p$  jednotlivých oktávových pásem. Podle zbarvení jednotlivých kulových ploch je patrné, že se jedná o nízkofrekvenční hluk.



Obr. 58 Grafické zobrazení jednotlivých oktávových pásem

### 7.4.4 VIZUALIZACE HLUČNOSTI VARIANTY 5H5V

Na obr. 59 je grafické zobrazení jednotlivých nastavení lamel pro variantu 5H5V.



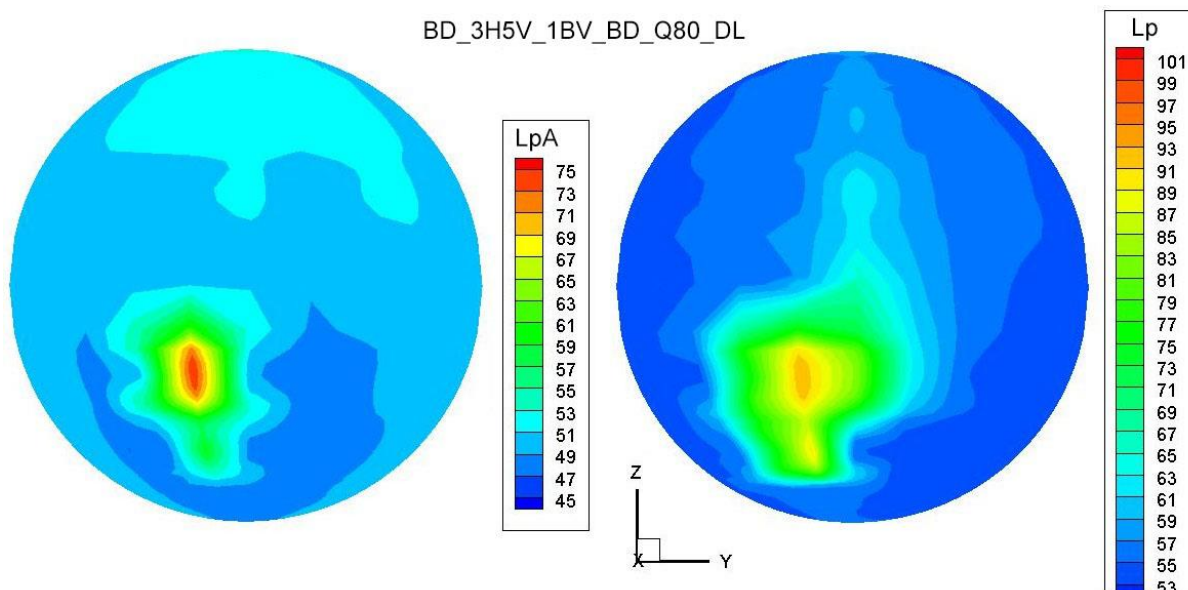
Obr. 59 Grafické zobrazení hlučnosti varianty 5H5V



Podle tohoto grafického zobrazení ekvivalentních hladin akustického tlaku by bylo možné přibližně určovat směřování jednotlivých variant. U bodů v proudu vzduchu jsou pozorovány zvýšené hladiny akustických tlaků v oblasti nízkých frekvencí (na rozdíl od bodů, které leží mimo proud).

#### 7.4.5 GRAFICKÉ ZOBRAZENÍ $L_p$ A $L_{pA}$ U VARIANTY 3H5V\_DL

Na obr. 60 je varianta 3H5V s nastavením lamel na DL zobrazena s váhovým filtrem A vlevo a bez filtru vpravo. Hladiny akustických tlaků s filtrem A se u této varianty pohybují cca od 47 do 75 dB a bez filtru cca od 53 do 95 dB.



Obr. 60 Grafické zobrazení 3H5V\_DL ( $L_{pA}$  a  $L_p$ )

### 7.5 VÝPOČETNÍ VZTAH VYHODNOCOVÁNÍ VYÚSTEK

Existuje mnoho druhů vyústek, které mají odlišné konstrukční a aerodynamické vlastnosti, a proto je velmi obtížné stanovit vzorec hladiny akustického výkonu s váhovým filtrem A, jenž by všechny popisoval. V této kapitole je na základě experimentálních výsledků vytvořen vztah č. 48, který popisuje závislost akustického výkonu s filtrem A na rychlosti a tlakové ztrátě.

Vzorec č. 46 podle [1] byl vytvořen na základě mnoha experimentů na různých vyústkách a určuje hladinu akustického výkonu s váhovým filtrem A. Váhování filtrem A je použito, protože výsledky následně odpovídají vnímání lidským sluchem. Hluk z vyústek již nelze dále tlumit.

$$L_{WA} = 60 \log w + 31,8 \log \xi + 10 \log S + 0,5 \quad [\text{dB}] \quad (46)$$

Kde:  $w$ ...rychlost proudění vzduchu ve jmenovitém průřezu vyústky [ $\text{m s}^{-1}$ ]  
 $\xi$ ...součinitel místní tlakové ztráty vyústky [–]  
 $S$ ... jmenovitý průřez vyústky [ $\text{m}^2$ ]

Součinitelé místních tlakových ztrát regulačních klapek umístovaných před vyústkou se nachází v tab. 18.

Tab. 18 Součinitel místní tlakové ztráty vyústky v závislosti na otevření regulačních listů [1]

Otevření [%]	100	50	25
$\zeta$ [-]	1,30	3,21	6,81

V tomto případě jsou naměřené výsledky akustického výkonu s filtrem A  $L_{WA}$ , naměřenou průtočnou rychlost na výstupu z vyústky  $w$  a tlakovou ztrátu vlivem místních odporů  $\Delta p_F$ . Hustota vzduchu se vypočítá z teploty vzduchu. Celkový součinitel místních odporů zjistíme podle vzorce č. 47. [35]

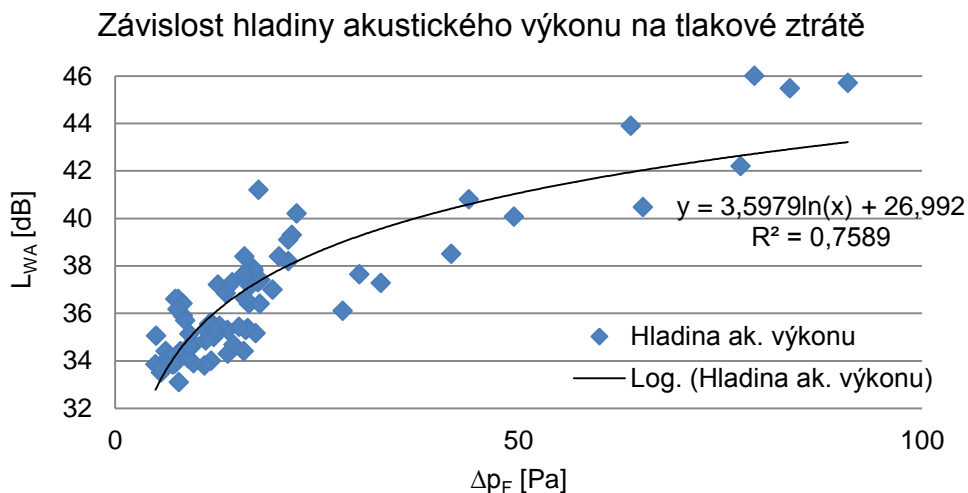
$$\Delta p_F = \sum_{i=1}^m \zeta_i \frac{w_i^2}{2000} \rho_i \quad [\text{kPa}] \quad (47)$$

Kde:  $\zeta$ ...součinitel místního odporu [-]  
 $w$ ...průtočná rychlost [m/s]  
 $\rho$ ...hustota vzduchu [kg/m<sup>3</sup>]  
 $m$ ...počet místních odporů [-]

Ze závislosti hladiny akustického výkonu na tlakové ztrátě (viz obr. 61) a hladiny akustického výkonu na rychlosti z výstupu vyústky v ose proudu (viz obr. 62) byly odvozeny koeficienty pro vzorec, který byl upraven do tvaru:

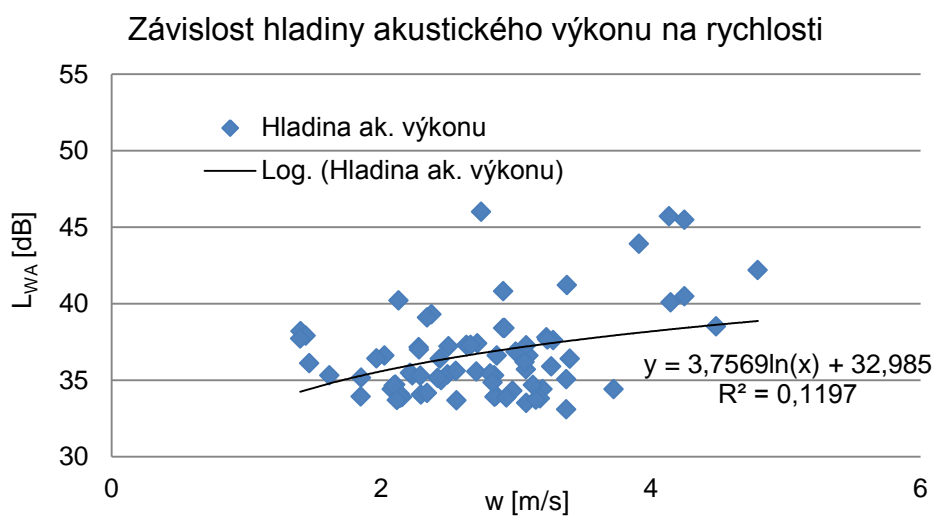
$$L_{WA} \approx 42 \log w + 27 \log \xi \quad [\text{dB}] \quad (48)$$

Sledovaný vzorec byl zjednodušen, z důvodu zanedbání jmenovitého průřezu vyústky.

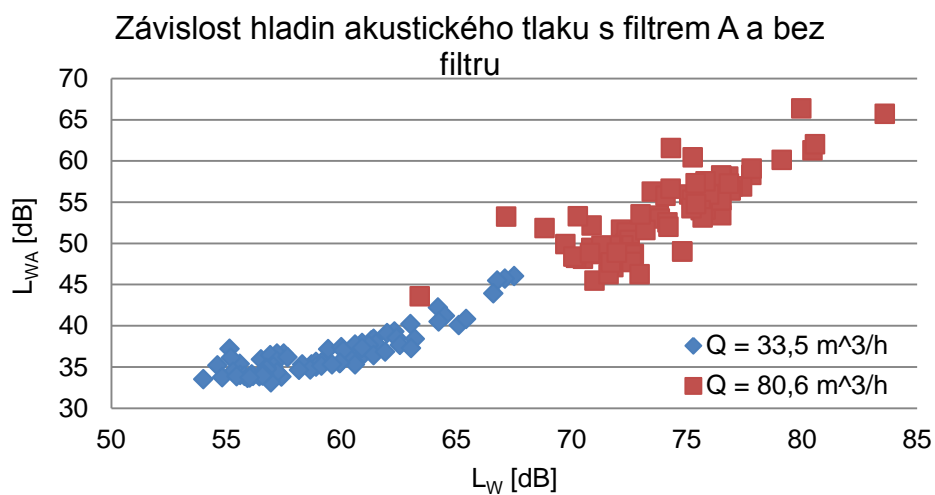


Obr. 61 Závislost hladiny akustického výkonu na tlakové ztrátě





Obr. 62 Závislost hladiny akustického výkonu na rychlosti



Obr. 63 Závislost hladin akustického tlaku s filtrem a bez

## 8 NÁVRHY NA OPATŘENÍ PRO SNÍŽENÍ HLUKU VE VYÚSTKÁCH

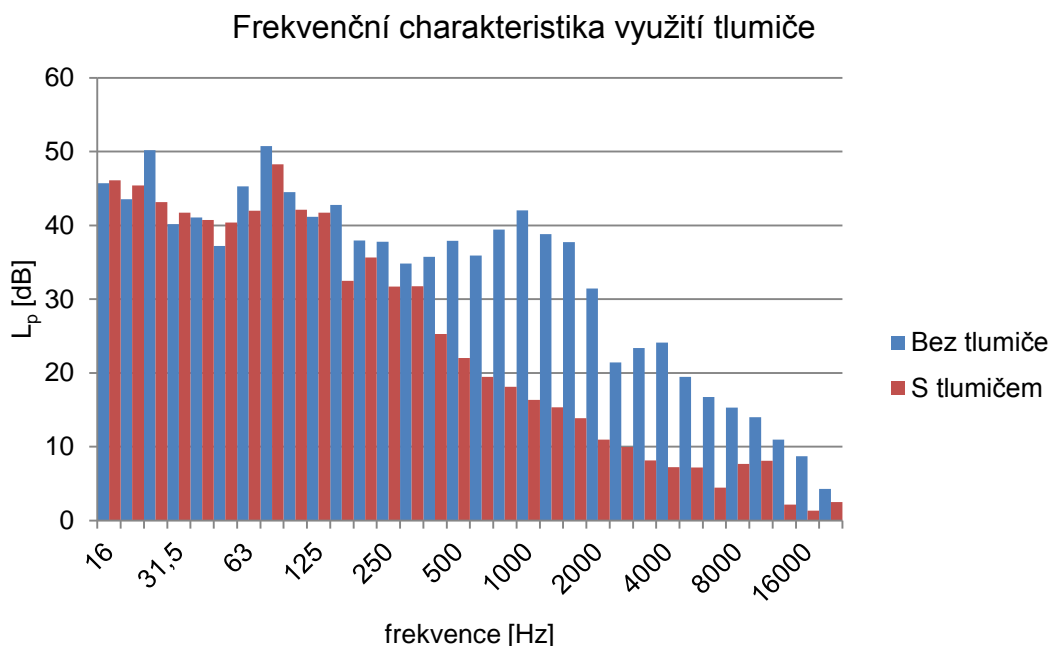
V této kapitole jsou na základě předchozích analýz a výsledků vybrány varianty vyústek vykazující nižší hlučnost než ostatní.

Hluk vystupující z vyústek do prostoru není tvořen pouze samotnou vyústkou, ale jsou zde i jiné zdroje, které nelze opomínat. Jedná se především o hluk tvořený ventilátorem, který je přenášen vzduchovodem, hluk vznikající při obtékání různých clon nebo uzavíracích klapek a hluk tvořený v přímém potrubí nebo v kolenech či obloucích.

### 8.1 POUŽITÍ ABSORPČNÍHO TLUMIČE

Pro tento experiment byl použit absorpční komorový tlumič hluku zobrazený na obr. 22, který byl vyroben speciálně pro toto měření.

Kvůli ověření funkčnosti tlumiče bylo zapotřebí provést měření na stejné variantě vyústky při stejných provozních podmínkách s tlumičem a následně bez tlumiče. Měřená varianta BM\_5H5V\_1BV\_BD\_Q33\_MM s tlumičem výsledně činila podle tab. 5  $L_{WA} = 32,1$  dB a bez tlumiče  $L_{WA} = 48,3$  dB. S použitím tlumiče tedy vycházejí hodnoty o 12,6 dB nižší.



Obr. 64 Třetinooktávová charakteristika použití tlumiče

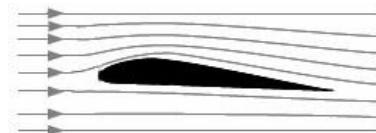
Z grafu na obr. 64 lze vyčíst, že použitý absorpční komorový tlumič hluku snižuje hluk především ve středních a vysokých frekvencích.

Zpracování tlumiče hluku do automobilového vzduchotechnického systému a výběr nejvhodnějšího typu je však téma pro další zkoumání. Požadavky na tlumiče v automobilech jsou kladeny především na co nejmenší rozměry v souladu s kvalitním utlumením hluku.

## 8.2 VÝBĚR UZAVÍRACÍ Klapky

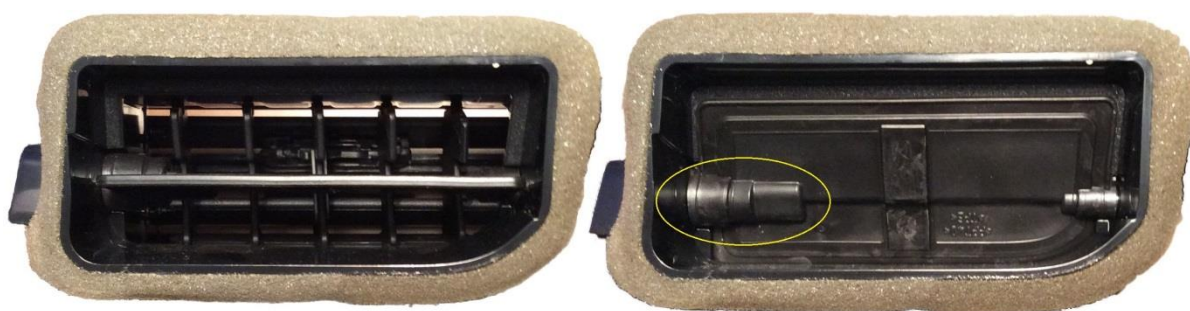
U klapky se jedná o obtékání různých geometrických tvarů. S rostoucí tlakovou ztrátou obtékaného předmětu je zvyšována hlučnost.

Při vyšším průtoku vyšla nejhůře klasická jednoduchá motýlková klapka, která nejvíce ovlivňuje proud vzduchu svým válcovým průřezem v ose klapky. Další zkoumání by se mohlo zabývat otázkou změny charakteru proudění vzduchu přes uzavírací klapku v závislosti na hlučnosti, pokud by se změnila jejich vzdálenost od vyústky.



Obr. 65 Lopatkový profil [35]

Vzhledem k výsledkům této práce by bylo vhodné používat klapky s tvarem aerodynamického lopatkového profilu, které by snížily tvorbu nepříznivých vírů za klapkou.



Obr. 66 Uzavírací klapka vyústky SK37 (pohled ze vzduchovodu)

Na obr. 66 je zobrazena tenkostěnná uzavírací klapka vyústky SK37, která má dobré uzavírací i aerodynamické vlastnosti. Jelikož uchycení pro mechanické otevírání se zdá být zbytečně robustní (žlutě vyznačeno) a vzniká zde aerodynamický hluk tvořený při obtékání těles, bylo by účelné např. nahrazení uchycením s menšími a aerodynamičtějšími rozměry z odolnějšího materiálu.

## 8.3 POUŽITÍ VODICÍCH LOPATEK DO OBLOUKU

Použití lopatek se ukázalo jako velice vhodná varianta pro snižování hluku z vyústek. Při nižším průtoku vyšly rozdíly mezi variantou s lopatkami a bez nich od 1,2 do 3,4 dB a při vyšším průtoku vyšla varianta s vloženými vodicími lopatkami cca o 4 až 8 dB lépe než bez lopatek.

Po dalším analyzování frekvenčních charakteristik bylo zjištěno, že u oblouku s vodicími lopatkami a bez nich vycházejí body v proudu vzduchu podobně, ale rozdíl je patrný v bodech měřených mimo proud vzduchu viz obr. 56.

Na základě těchto výsledků z hlediska hlučnosti je nevhodnější použití vodicích lopatek v kolenech a obloucích. Vodicí lopatky by měly být tenké a mít aerodynamické (proudnicové) tvary náběžných a odtokových hran.

## 8.4 POUŽITÍ AERODYNAMICKÝCH TVARŮ LAMEL

Jak již je tu několikrát zmíněno, nejvýhodnější z hlediska tlakové ztráty a hlučnosti je proudnicový (aerodynamický) tvar.

Při testování dvou naprosto stejných variant za stejných experimentálních podmínek s jediným rozdílem, kterým je použití zadních lamel aerodynamického tvaru místo klasického plochého tvaru, bylo potvrzeno snížení hlučnosti. Při nižším průtoku byly naměřeny hodnoty snížení hlučnosti do 1 dB a při vyšším průtoku byl naměřen příznivý rozdíl od 2 dB do 6 dB. Z těchto výsledků je zřejmé, že při vyšších rychlostech proudění vzduchu je tvar lamel velice podstatný.

## 8.5 NÁVRH VYÚSTKY

Tato kapitola slouží k volbě varianty s nejlepšími akustickými vlastnostmi, popřípadě k volbě vhodné kombinace hlučnosti se směřováním.

V tab. 19 je posouzeno všech patnáct konstrukčních variant výustek z hlediska hlučnosti při obou průtocích vzduchu a směřování z bočního a horního pohledu. Červeným křížkem jsou označeny varianty, které jsou ve svém zaměření horší než ostatní nebo zcela špatné. U směřování jsou křížkem označeny i varianty, které naprosto nevyhovují pouze v jednom nastavení lamel. U směřování je nejproblémovější nastavení UR.

Světle modrou barvou jsou zvýrazněny základní varianty, kde se mění pouze různá poloha a počet lamel. Těchto osm variant nejlépe popisuje vlastnosti samotných výustek. Ostatní varianty charakterizují akustické vlastnosti uzavíracích klapek, přímého vzduchovodu nebo kolena a eventuálně vložených vodicích lopatek.

Tab. 19 Výběr nejméně hlučné varianty

Č. v.	Označení varianty	Hluk		Směřování	
		33,5 [m <sup>3</sup> /h]	80,6 [m <sup>3</sup> /h]	Boční pohled	Horní pohled
1	SK37	✓	✓	✓	✓
2	BM_5H5V_1BV_STR	✗	✗	✓	✗
3	BM_5H5V_BV2_STR	✗	✗	✓	✗
4	BM_5H5V_1BVR_STR	✗	✗	✓	✗
5	BM_5H5V_1BVS_STR	✗	✗	✓	✗
6	BM_5H5V_1BV_BD	✗	✗	✓	✗
7	BM_3H5V_1BV_BD	✓	✗	✓	✓
8	BM_5H5VN_1BV_BD	✓	✗	✓	✗
9	BM_5H3V_1BV_BD	✓	✗	✓	✗
10	BM_3H3V_1BV_BD	✓	✓	✓	✗
11	BM_5H5V_1BV_BDTV	✓	✓	✓	✗
12	BM_5V5H_1BV_BD	✓	✓	✗	✗
13	BM_3V5H_1BV_BD	✓	✓	✗	✗
14	BM_5V3H_1BV_BD	✓	✓	✗	✓
15	BM_3V3H_1BV_BD	✓	✗	✗	✗

Jako nejméně hlučné varianty vyšly všechny s předními vertikálními lamelami s výjimkou kritických nastavení lamel u 3V3H při vyšším průtoku. Z variant s předními horizontálními lamelami patří do méně hlučných pouze varianta 3H3V.

Nejhorší z hlediska hlučnosti se zdá být varianta 5H5V, která zároveň patří mezi nejpoužívanější u většiny automobilových výrobců.

Pokud vezmeme v úvahu kombinaci hluku a směřování, tak vychází nejlépe vyústka 5V3H, jež vykazuje nízkou hlučnost a zároveň splňuje směřování v horním pohledu. Boční pohled nesplňuje tato vyústka pouze při nastavení lamel na UR, kde směřují chybně všechny varianty vyústek s předními vertikálními lamelami. Tato vyústka má zároveň velmi nízkou tlakovou ztrátu ve všech nastaveních lamel.

Nejlepší směřování bylo naměřeno u varianty 3H5V. Tato varianta nepatří mezi nejméně hlučné, avšak stále je o cca 3 až 10 dB tišší než varianta 5H5V při průtoku  $80,6 \text{ m}^3/\text{h}$ , což může být rozhodující při výběru mezi těmito variantami.

Vyústka SK37 nejde příliš s ostatními variantami srovnávat např. z důvodu rozdílného příváděcího vzduchovodu. Nicméně pokud dojde k porovnávání s ostatními variantami testovaných vyústek, hlučnost SK37 je na pomyslném středu mezi ostatními vyústkami. Lamely této vyústky jsou plochého tvaru se zaoblením. Z aspektu hlučnosti by nepochybně pomohlo vyměnit stávající lamely za lamely aerodynamických tvarů.



*Obr. 67 Vyústka SK37*

## 9 NORMY A NAŘÍZENÍ VLÁDY

V této kapitole jsou uvedeny a zjednodušeně popsány normy a vládní nařízení související s hlukem z vyústek a komplexně s hlukem ve vzduchotechnických zařízeních. Tento experiment nebyl prováděn podle zde zmiňovaných norem, byl jimi pouze inspirován.

### 9.1 NORMA ČSN EN ISO 5136

Česká verze evropské normy se nazývá „*Akustika – Určování hladin akustického výkonu vyzařovaného do potrubí ventilátory a jinými zařízeními s prouděním vzduchu – Metoda měření v potrubí*“. Tato norma formuluje metodu měření hladin akustického tlaku ve výtlačném nebo sacím potrubí ventilátoru. Dále popisuje metodu pro výpočet hladin akustického výkonu vyzařovaného do potrubí tímto ventilátorem. [32]

Naše měřicí trať by musela být nepatrně upravena, aby se dalo toho měření uskutečnit.

### 9.2 NORMA ČSN EN ISO 3740

Tato norma se nazývá „*Akustika – Určení hladin akustického výkonu zdrojů hluku – Směrnice pro použití základních norem*“ a představuje instrukce pro používání dalších mezinárodních norem sloužících pro různé metody určení hladin akustického výkonu odlišných zdrojů hluku. [38]

### 9.3 NORMA ČSN EN ISO 3744

Norma „*Akustika – Určování hladin akustického výkonu a hladin akustické energie zdrojů hluku pomocí akustického tlaku – Technická metoda pro přibližně volné pole nad odrazivou rovinou*“ určuje metody stanovení hladiny akustického výkonu a hladiny akustické energie z hladin akustického tlaku. Měření je prováděno na ploše obklopující sledovaný zdroj hluku. Následně je zde popsáno dopočítání akustického výkonu. Na základě této normy byly vypočítány nejistoty měření. [37]

### 9.4 VÝPIS NOREM VZTAHUJÍCÍCH SE K TÉMATU

Zde jsou vypsány normy a nařízení vlády, které se zabývají podobným tématem.

- ČSN EN ISO 3741 (*Akustika - Určení hladin akustického výkonu zdrojů hluku pomocí akustického tlaku - Přesné metody pro dozvukové místnosti*)
- ČSN EN ISO 3746 (*Akustika – Určování hladin akustického výkonu a hladin akustické energie zdrojů hluku pomocí akustického tlaku – Provozní metoda s měřicí obalovou plochou nad odrazivou rovinou*)
- ČSN EN ISO 7235 (*Akustika – Laboratorní měřicí postupy pro tlumiče hluku v potrubí a vzduchotechnické koncové jednotky – Vložený útlum, vlastní hluk a celková tlaková ztráta*)
- ČSN EN ISO 14163 (*Akustika – Směrnice pro snižování hluku tlumiči*)
- ČSN ISO 12 0017 (*Metody měření a hodnocení hluku vzduchotechnických zařízení*)

## ZÁVĚR

Tato práce byla zaměřena na experimentální zhodnocení hluku při proudění vzduchu ze vzduchotechnické vyústky nacházející se v osobním automobilu. Hlavním cílem bylo porovnat jednotlivé konstrukční varianty vyústek, na základě čehož posléze navrhnout opatření pro snižování hluku ve vyústkách. V rešeršní části práce bylo nezbytné získat informace a vědomosti o zadaném tématu. Mimo jiné práce obsahuje i stručný přehled základů akustiky týkající se dané problematiky, popisuje zkušební zařízení a jednotlivé konstrukční varianty měřených vyústek.

V prvním kroku praktického experimentu bylo zapotřebí odhlučnit měřicí trať a zároveň odhlučnit a snížit dobu dozvuku v měřené laboratoři. Na stěny a stropy místnosti byly nalepeny pohltivé akustické panely Rockfonic a okolo ventilátoru byl vytvořen akustický kryt z podobných materiálů, které byly použity na stěny a stropy místnosti. Pro tento experiment byl speciálně sestaven akustický komorový tlumič hluku, jenž byl nainstalován do výtlačného vzduchovodu a jehož stěžejním úkolem bylo zamezovat přenášení hluku tvořeného ventilátorem k měřené vyústce. Následně byly odstraněny i některé méně výrazné zdroje hluku akustického pozadí.

Po dostatečném snížení hluku pozadí byla provedena příprava experimentu a odladění metodiky měření. Z důvodu specifického měření nebylo postupováno striktně podle norem, ale byla zde vytvořena vlastní metodika na základě určitých testovacích měření. Podle těchto měření bylo následně provedeno např. určení oblasti a rozložení měřicích bodů na kulové ploše okolo vyústky, stanovení počtu bodů, vytyčení vzdálenosti mikrofону od sledované vyústky nebo provedení výběru nejvhodnějšího krytu na mikrofón. Pomocí optimalizované metodiky byly naměřeny všechny konstrukční varianty vyústky.

V další části práce byla zpracována naměřená data, z kterých byly vypočítány hladiny akustických výkonů. Na základě těchto výsledků byla vytvořena databáze hlučnosti jednotlivých vyústek, jež může být porovnávána s jinými obory zkoumání. Podle těchto výsledků byly provedeny různé analýzy a vyhodnocení, např. porovnávání jednotlivých naměřených variant z hlediska hlučnosti, komplexní hodnocení jednotlivých variant z více parametrů dohromady (hluk, směřování, tlakové ztráty), frekvenční analýza a grafická vizualizace hlučnosti vybraných vyústek.

První z analýz byla zaměřena na porovnávání jednotlivých variant vyústek z hlediska vlivů různých konstrukčních transformací na celkovou hladinu akustického výkonu. Při sledování vlivu pořadí lamel na  $L_{WA}$  bylo zjištěno, že varianty s předními horizontálními lamelami jsou hlučnější než varianty s předními vertikálními lamelami a že při použití variant s předními horizontálními lamelami a zadními vertikálními záleží na celkovém součtu všech lamel. S jejichž rostoucím počtem je zvyšována i hlučnost. Avšak pokud jsou použity přední lamely vertikální, nezáleží příliš na celkovém počtu. Posléze zde byly porovnány vlivy rozdílných komponentů příváděcího vzduchovodu v blízkosti vyústky. Bylo zjištěno, že rozdílné uzavírací klapky nemají velký vliv na celkovou hladinu akustického výkonu, zatímco použití vodicích lopatek do oblouku je velkým přínosem pro snižování hlučnosti. Dále bylo potvrzeno, že hlučnější se jeví varianta s obloukem oproti variantě přímého vzduchovodu a že použití aerodynamických (proudnicových) tvarů lamel snižuje hlučnost.

Varianty s předními vertikálními lamelami jsou obvykle méně hlučné, špatně směřují, avšak naopak je to u variant s lamelami předními horizontálními. Z celkových výsledků vyplývá, že nejhůře vycházejí kritická nastavení lamel (UR, DL), která mají zároveň největší tlakové ztráty. Dalším poznatkem ze zkoumání je výrazné zvyšování nízkofrekvenčního hluku v oblasti proudu vzduchu.

V rámci celého experimentu je možné si povšimnout, že nejlépe vychází varianta 5V3H, která disponuje malou hlučností a pouze jedním chybným směřováním v bočním pohledu při kritickém nastavení lamel na UR. Hlučnost vyšla jednoznačně nejhůře u velice často používané varianty 5H5V. U originální vyústky SK37 byla vypočítána průměrná hodnota  $L_{WA}$  ze všech nastavení lamel na cca 52 dB, zatímco u varianty 5V3H vyšla tato hodnota o 3 dB nižší ( $L_{WA} = 49$  dB). Tyto hodnoty byly vypočítány pro vyšší průtok 80,6 m<sup>3</sup>/h.

Na základě výsledků řešené problematiky je možné se domnívat, že by tato diplomová práce mohla pomoci při výběru nebo návrhu optimální vyústky v osobním automobilu.



## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] NOVÝ, Richard. *Hluk a chvění*. 2.vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000, 389 s. ISBN 80-01-02246-3.
- [2] VAŇKOVÁ, Marie a kolektiv. *Hluk, vibrace a ionizující záření v životním a pracovním prostředí část I*. 1.vyd. Brno: PC-DIR, spol. s.r.o., 1995. 140 s. ISBN 80-214-0695-X.
- [3] MIŠUN, V. *Vibrace a hluk*. Brno : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2005. ISBN 80-214-3060-5.
- [4] SMETANA, Ctirad, et al. *Hluk a vibrace: Měření a hodnocení*. 1. Vydání. Praha 1: Sdělovací technika, 1998. 188 s. ISBN 80-901936-2-5.
- [5] SCHAUER, P. *Vybrané statě z akustiky* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008 [cit. 2016-03-10]. Dostupné z: [http://fyzika.fce.vutbr.cz/doc/vyuka\\_schauer/vybrane\\_state\\_z\\_akustiky.pdf](http://fyzika.fce.vutbr.cz/doc/vyuka_schauer/vybrane_state_z_akustiky.pdf)
- [6] Environmentální fyzika. *Ústav fyziky a materiálového inženýrství* [online]. [2013] [cit. 2016-02-09]. Dostupné z: [http://ufmi.ft.utb.cz/index.php?page=env\\_fyzika](http://ufmi.ft.utb.cz/index.php?page=env_fyzika)
- [7] SZÉKYOVÁ, Marta, Karol FERSTL, Richard NOVÝ. *Větrání a klimatizace*. Bratislava: JAGA GROUP, s.r.o., 2006. 359 s. ISBN 80-8076-037-3.
- [8] *Obtékání těles*. Praha, 2010. Dostupné z: <http://www.vscht.cz/uchi/ped/hydroplo/materialy/>
- [9] ŠKORPÍK, Jiří. *Ztráty v lopatkových strojích, Transformační technologie*, 2009-11, [last updated 2015-01]. Brno: Jiří Škorpík, [online] pokračující zdroj, ISSN 1804-8293. Dostupné z <http://www.transformacni-technologie.cz/ztraty-v-lopatkovych-strojich.html>.
- [10] VÉR, István L. a Leo L. BERANEK. *Noise and vibration control engineering: principles and applications*. 13. New Jersey: Wiley, 2006. ISBN 978 0 471 44942 3.
- [11] ADAM, J.-L., Dubief F. a Guy C. *Aeroacoustic simulation of automotive ventilation outlets* [online]. Paris, 2008, 6 [cit. 2016-04-10]. Dostupné z: <http://webistem.com/acoustics2008/acoustics2008/cd1/data/articles/000247.pdf>
- [12] Automotive: HVAC System and Blower Noise. *Exa* [online]. Exa Corporation, 2016 [cit. 2016-04-06]. Dostupné z: [http://exa.com/hvac\\_system\\_blower\\_noise](http://exa.com/hvac_system_blower_noise)
- [13] DALY, Steven. *Automotive air-conditioning and climate control systems*. Boston, 2006. ISBN 978-075-0669-559.
- [14] NĚMEC, Jaroslav, Jiří RANSDORF a Milan ŠNĚDRLE. *Hluk a jeho snižování v technické praxi*. Praha: SNTL, 1970. ISBN 04-222-70.
- [15] BHATIA, A. Overview of Noise Control and HVAC Acoustic in Buildings. *Vibrationdata* [online]. [2012] [cit. 2016-02-11]. Dostupné z: <http://www.vibrationdata.com/tutorials2/m206content.pdf>
- [16] CHYSKÝ, Jaroslav a Karel HEMZAL. *Větrání a klimatizace*. 3. přepracované vyd. Praha: BOLIT, 1993. ISBN 80-901574-0-8.
- [17] BZ-5503 and 2250/2270 user manuals. *Brüel & Kjær* [online]. 2016 [cit. 2016-04-17]. Dostupné z:

- <http://www.bksv.com/ServiceCalibration/Support/Downloads/2250%20Maintenance/BZ-5503%20and%202250%20and%202270%20user%20manuals>
- [18] Zvukoměr 2270. *Spectris Praha spol. s r.o.* [online]. Praha: grafické studio JZD [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://mereni-a-analyza-signalu-hluku-a-vibraci.spectris.cz/zvukomer-2270/>
- [19] CALETKA, Petr a Ondřej PECH. *Dabáze konstrukčních parametrů vzduchotechnických vyústek*. Brno, 2016.
- [20] Nová ŠKODA Octavia - Interiér. *ŠKODA AUTO* [online]. 2015 [cit. 2016-04-07]. Dostupné z: <http://cs.skoda-auto.com/models/new-octavia/interior>
- [21] NĚMCOVÁ, M. *Hluková mapa*: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav biomedicínské inženýrství, 2014. 64 s. Vedoucí práce byl doc. Ing. Jiří Rozman, CSc.
- [22] GRULICH, Ondřej. Využití numerických metod při analýze tlumících parametrů materiálu. Zlín, 2007. Vedoucí práce Ing. Dušan Fojtů.
- [23] Pohlcování zvuku. *PAROC* [online]. Paroc, 2016 [cit. 2016-02-19]. Dostupné z: [http://www.paroc.cz/knowhow/zvuk/pohlcovani-zvuku?sc\\_lang=cs-CZ](http://www.paroc.cz/knowhow/zvuk/pohlcovani-zvuku?sc_lang=cs-CZ)
- [24] Prodotti. *2Bresine* [online]. Kilab, 2015 [cit. 2016-02-19]. Dostupné z: <http://2bresine.it/prodotti-fonoassorbentiEN.php>
- [25] Konstrukce na pohlcování zvuku. *TZB-info* [online]. Praha: Topinfo s.r.o., vcopyright©2001-2016 [cit. 2016-03-25]. Dostupné z: <http://stavba.tzb-info.cz/akustika-staveb/228-konstrukce-na-pohlcovani-zvuku>
- [26] Akustický výkon zdroje hluku. *Ústav fyzikálního inženýrství* [online]. Brno, 2013 [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: <http://physics.fme.vutbr.cz/~mcerny/BF/labiny/Akvykon.pdf>
- [27] Stanovení hladin akustického výkonu zdrojů hluku pomocí akustického tlaku. *České vysoké učení technické v Praze* [online]. Praha, ©2009-2016 [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: [https://www.ib.cvut.cz/sites/default/files/Studijni\\_materialy/EXM/EXM\\_uloha\\_ak\\_vykon.pdf](https://www.ib.cvut.cz/sites/default/files/Studijni_materialy/EXM/EXM_uloha_ak_vykon.pdf)
- [28] VÉR, I. L. a Leo L. BERANEK. *Noise and vibration control engineering: principles and applications*. 2nd ed. Hoboken, N.J.: Wiley, c2006. ISBN 978-047-1449-423.
- [29] ČSN EN ISO 3746. *Akustika – Určování hladin akustického výkonu a hladin akustické energie zdrojů hluku pomocí akustického tlaku: Provozní metoda s měřicí obalovou plochou nad odrazivou rovinou*. Brno: Úřad pro technickou normalizaci, 2011.
- [30] Windscreens. *Brüel & Kjær* [online]. Copyright © Brüel & Kjær [cit. 2016-03-31]. Dostupné z: <http://www.bksv.com/Products/transducers/acoustic/accessories/windscreens>
- [31] Nose cones. *Brüel & Kjær* [online]. Copyright © Brüel & Kjær [cit. 2016-03-31]. Dostupné z: <http://www.bksv.com/Products/transducers/acoustic/accessories/nose-cones>
- [32] ČSN EN ISO 5136. *Akustika - Určování hladin akustického výkonu vyzařovaného do potrubí ventilátory a jinými zařízeními s prouděním vzduchu: Metoda měření v potrubí*. Brno: Úřad pro technickou normalizaci, 2010.

- [33] CALETKA, P. *Posouzení funkčnosti různých modifikací větrací vyústky pro kabinu osobního vozu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. XY s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jan Jedelský, Ph.D.
- [34] Visualization & Analysis Tools for Scientists and Engineers. *Tecplot* [online]. Bellevue, 2016 [cit. 2016-05-11]. Dostupné z: <http://www.tecplot.com/>
- [35] Ochrana ovzduší: Potrubní rozvody a ventilátory. *Pomocné učební texty TP* [online]. Praha, 2006 [cit. 2016-05-26]. Dostupné z: [http://homel.vsb.cz/~lih90/\\_soubory/oo/03-01.pdf](http://homel.vsb.cz/~lih90/_soubory/oo/03-01.pdf)
- [36] ŠKORPÍK, Jiří. Základy aerodynamiky profilů lopatek a lopatkových mříží, *Transformační technologie*, 2009-10, [last updated 2016-03-04]. Brno: Jiří Škorpík, [on-line] pokračující zdroj, ISSN 1804-8293. Dostupné z <http://www.transformacni-technologie.cz/zaklady-aerodynamiky-profilu-lopatek-a-lopatkovych-mrizi.html>.
- [37] ČSN EN ISO 3744. *Akustika - Určování hladin akustického výkonu a hladin akustické energie zdrojů hluku pomocí akustického tlaku - Technická metoda pro přibližně volné pole nad odrazivou rovinou*. Praha: Český normalizační institut, 2011.
- [38] ČSN EN ISO 3740. *Akustika – Určení hladin akustického výkonu zdrojů hluku: Směrnice pro použití základních norem*. Brno: Úřad pro technickou normalizaci, 2001.

## SEZNAM POUŽITÝCH VELIČIN

- $A$  – celková zvuková pohltivost [ $\text{m}^2$ ]  
 $A_k$  – pohltivost jednoho člověka [ $\text{m}^2$ ]  
 $A_n$  – celková pohltivost místnosti [ $\text{m}^2$ ]  
 $c$  – rychlost šíření akustické vlny [ $\text{m/s}$ ]  
 $D$  – průměr klapky [ $\text{m}$ ]  
 $d$  – šířka kolene [ $\text{m}$ ]  
 $f$  – frekvence (kmitočet) [ $\text{Hz}$ ]  
 $F$  – síla [ $\text{N}$ ]  
 $f_m$  – střední frekvence v oktavovém pásmu [ $\text{Hz}$ ]  
 $I_0$  – referenční hodnota ( $10^{-12}$ ) [ $\text{W/m}^2$ ]  
 $k$  – činitel rozšíření [-]  
 $K_f$  – korekce formulující tvar spektra (závislá na Strouhalově čísle) [ $\text{dB}$ ]  
 $K_\zeta$  – konstanta, formulující vliv místní tlakové ztráty [-]  
 $l$  – délka tětiny lopatky [ $\text{m}$ ]  
 $L_{\text{Aeq}}$  – je fiktivní ustálená hladina, která má stejný účinek na člověka jako proměnný hluk během stejného časového úseku [ $\text{dB}$ ]  
 $L_{\text{AFmax}}$  – maximální hodnota hladiny akustického tlaku vážená akustickým filtrem A (rychlý čas vážení) za dobu měření [ $\text{dB}$ ]  
 $L_{\text{AFmin}}$  – minimální hodnota hladiny akustického tlaku vážená akustickým filtrem A (rychlý čas vážení) za dobu měření [ $\text{dB}$ ]  
 $L_{\text{ASmax}}$  – maximální hodnota hladiny akustického tlaku vážená akustickým filtrem A (pomalý čas vážení) za dobu měření [ $\text{dB}$ ]  
 $L_{\text{ASmin}}$  – minimální hodnota hladiny akustického tlaku vážená akustickým filtrem A (pomalý čas vážení) za dobu měření [ $\text{dB}$ ]  
 $L_{\text{pav}}$  – hladina aritmetického průměru vypočítaná pro tato opakování [ $\text{dB}$ ]  
 $L_{\text{pj}}$  – hladina akustického tlaku měřená v předepsané poloze [ $\text{dB}$ ]  
 $L_{\text{sp}}$  – specifická hladina akustického výkonu (závislá na parametrech kolena) [ $\text{dB}$ ]  
 $m$  – počet místních odporů [-]  
 $N$  – počet měření [-]  
 $n$  – počet osob [-]  
 $n$  – počet vodících lopatek [-]  
 $P_0$  – referenční hodnota ( $10^{-12}$ ) [ $\text{W}$ ]  
 $p_0$  – referenční hodnota ( $p_0 = 2 \times 10^{-5}$  a odpovídá hodnotě 0 dB) [ $\text{Pa}$ ]  
 $p_{\text{ef}}$  – efektivní akustický tlak [ $\text{Pa}$ ]  
 $Q$  – činitel směrovosti [-]  
 $Q_V$  – objemový průtok vzduchu [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]  
 $r$  – poloměr kulové plochy od středu vyústky [ $\text{m}$ ]  
 $S$  – průřez potrubí [ $\text{m}^2$ ]  
 $Sh$  – Strouhalovo číslo [-]  
 $S_k$  – měřicí kulová plocha obklopující vyústku [ $\text{m}^2$ ]  
 $S_{kl}$  – jmenovitý průřez klapky [ $\text{m}^2$ ]  
 $S_v$  – celková plocha ohraničující místnost [ $\text{m}^2$ ]  
 $T$  – doba jednoho kmitu (perioda) [ $\text{s}$ ]  
 $V$  – objem místnosti [ $\text{m}^3$ ]  
 $\dot{V}$  – proudící množství vzduchu [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]  
 $v$  – rychlost kmitání částic [ $\text{m/s}$ ]  
 $w$  – rychlost proudění vzduchu [ $\text{m/s}$ ]

$w_c$  – rychlost proudění v zúženém průřezu [m/s]  
 $x$  – odlehlost [m]  
 $\alpha_i$  – činitel akustické pohltivosti materiálu [-]  
 $\alpha_S$  – součinitel pohltivosti [-]  
 $\zeta$  – součinitel místní tlakové ztráty [-]  
 $\rho$  – hustota vzduchu [kg/m<sup>3</sup>]  
 $\rho$  – měrná hmotnost [kg/m<sup>3</sup>]  
 $\sigma_{omc}$  – směrodatná odchylka [dB]  
 $\sigma_{RO}$  – směrodatná odchylka reprodukovatelnosti [dB]  
 $\sigma_{tot}$  – celková směrodatná odchylka [dB]  
 $\tau$  – čas [s]  
 $\omega$  – vlastní úhlová frekvence [s<sup>-1</sup>]